

# **AALTO-YLIOPISTO**

Insinööritieteiden korkeakoulu

Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma

Rakennusmateriaalit ja -tuotantotekniikka

**Totti Einari Tuutti**

## **Lämpödynaamisen mallin demonstrointi simuloidun lattialämmitysjärjestelmän ohjauksessa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Espoossa 17. maaliskuuta 2014

Valvoja: Professori Jouko Pakanen Aalto-yliopisto

Ohjaaja: Professori Jouko Pakanen Aalto-yliopisto

---

**Tekijä** Totti Einari Tuutti

---

**Työn nimi** Lämpödynaamisen mallin demonstrointi simuloidun lattialämmitysjärjestelmän ohjauksessa

---

**Laitos** Rakennustekniikan laitos

---

**Professuuri** Talotekniikka

---

**Professuurikoodi** Rak-130

---

**Työn valvoja** Professori Jouko Pakanen

---

**Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t)** Professori Jouko Pakanen

---

**Päivämäärä** 17.03.2014

---

**Sivumäärä** 85+8

---

**Kieli** Suomi

---

### Tiivistelmä

Rakennusten energiankulutuksen pienentäminen on tärkeää sekä kustannuksellisesti että ympäristön kestävyysnäkökulmasta. Yksi vaihtoehto tähän on lämmityksen säädön tehostaminen.

Tämän diplomityön tavoitteena oli demonstroida Pakasen ja Karjalaisen kehittämää tilakoneeseen perustuvaa lämpödynaamista mallia [5] ja siihen perustuvaa säätömenetelmää rakennuksen vesikiertoisen lattialämmityksen ohjauksessa, erityisesti ulkolämpötilan ja auringon säteilyn kompensoinnissa. Menetelmää kokeiltiin sekä kevyessä että massiivisessa rakennuksessa erilaisilla lattialaatan vahvuuksilla. Lisäksi selvitettiin voiko sääennustetta hyödyntää ko. lämmityksen ohjauksessa. Vertailukohteena tilakoneeseen perustuvalla ratkaisulla oli perinteinen ns. säätösuoraan perustuva ulkolämpötilakompensointi.

Tutkimuksessa luotiin TRNSYS-simulointiohjelmiston avulla asuinrakennukseen kaksi lattialämmitysjärjestelmää. Järjestelmien erona oli ainoastaan niiden toiminta: toinen ohjasi lämmitystä perinteiseen tapaan säätösuoran avulla ja toinen tilakoneen avulla. Huonetermostaatti, joka kuuluu tyyppilliseen lattialämmitysjärjestelmään, jätettiin vertailun helpottamiseksi pois molemmista.

Mallin tulotietoina olivat ulkolämpötila ja auringon säteilytieto, lisäksi sisälämpötilamittausta käytettiin hyväksi dynaamisen mallin identifioinnissa. Tilakoneen avulla säädettäessä huomattiin selkeää parannusta sisäilman lämpötilan pysyvyydessä. Lisäksi energiankulutus pieneni verrattuna perinteiseen säätötapaan. Useiden tulotietojen hyödyntäminen mallissa samanaikaisesti osoittautui haastavaksi.

Massiivisuuden havaittiin hidastavan muutosta sisälämpötiloissa. Rakennuksen lämpökapasiteetti aiheuttaa rakennuksen lämmöntarpeeseen viivettä olosuhteiden muuttuessa, mutta myös lämmitysteho muuttuu viiveellä laatan lämpökapasiteetin vuoksi. Laatan lämpökapasiteetin aiheuttama viivettä lämmitystehoon voidaan kompensoida ohjaamalla lämmitystä sääennusteen avulla. Ulkolämpötilan ennakkoinnista oli hyötyä, jos ulkolämpötilassa tapahtuvien muutosten välinen aika oli suurempi kuin laatan lämpökapasiteetin aiheuttama viive. Vastaavasti auringon säteilyn ennuste voidaan ottaa huomioon ja viilentää rakennusta ennen varsinaisen säteilyn alkamista.

---

**Avainsanat** lattialämmitys, simulointi, mallipohjainen prediktoivasäätö, ennakoiva lämmitys, rakenteiden massiivisuus, tilakone, ohjauslogiikka

---

---

**Author** Totti Einari Tuutti

---

**Title of thesis** Demonstration of model based control in simulated floor heating system

---

**Department** Department of Civil and Structural Engineering

---

**Professorship** Building Services Technology

**Code of professorship** Rak-130

---

**Thesis supervisor** Professor Jouko Pakanen

---

**Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s)** Professor Jouko Pakanen

---

**Date** 17.03.2014

**Number of pages** 85+8

**Language** Finnish

---

### Abstract

It is both economically and environmentally important to decrease the energy consumption of buildings, and making the heating system control more efficient is a relevant option for doing that. The possibilities of the model-based predictive control to decrease energy consumption and to improve buildings indoor air condition have previously been discovered in many researches.

In this research a model-based predictive control is tested in the floor heating system. The applied dynamical model, which is based on state machine logic, is introduced in the journal article of Pakanen and Karjalainen [5]. The objective is to apply the state machine approach in weather compensation of heating control. The method is compared with the conventional method, where the temperature the circulating heating fluid is linearly dependent of the outdoor temperature. In this research also the thermal lag of structures and the possibilities of forecast in heating are examined.

The author of this research created two different floor heating systems in the TRNSYS-simulation program. Both were made in the same building, the only difference being the control system: the first was based on the conventional control method and the other on the state machine control. Forecasting was implemented by letting weather files to control the system in advance. Thermal lag was studied by changing the parameters of the structures.

The inputs of the model were outdoor temperature and solar radiation. In addition, indoor temperature was used in identification phase of the model. As a result, indoor temperature stability was better and energy consumption decreased substantially when the new model was used. Instead, using many input values in modelling the heating system at the same time was difficult.

Massive structures cause delay in the change of temperature. Buildings' thermal capacity creates lag in buildings' heat demand, but also heating efficiency changes slowly due to thermal capacity of slab. Lag of heating efficiency in a massive slab can be decreased by using forecast. If time of the control action is not correct or transitions are fast, energy consumption increases. Cooling the building before the start of solar radiation decreases the change of indoor temperature and energy consumption.

---

**Keywords** floor heating, simulation, model based control, state machine, control logic, thermal lag, weather forecast

---

## **Alkusanat**

Välillä asiat valmistuvat kuin itsestään. Niin kävi kun diplomityöaiheeni tempaisi minut simulointiohjelmiston ihmeelliseen maailmaan. Tuloksena siitä syntyi tulevan diplomi-insinöörin osoitus osaamisestaan. Työ tuntui palkinnolta sitkeästä opiskelusta. Mennyt syksy opetti minulle paljon ja antoi luottoa tulevaan.

Erityisesti haluan kiittää työni ohjaajaa, valvojaa ja työpariani Professori Jouko Pakasta luottamuksesta ja hienosti sujuneesta kirjaani edistävästä yhteistyöstä, sekä innokkuudesta, jolla hän tutkimukseen osallistui. Siirsin esille tulleen tiedon parhaani mukaan diplomi-työhöni.

Kiitokset lisäksi veljelleni Timmille päivittäisestä ymmärryksestä ja tuesta, siskolleni Tytille ja ystävälleni Maijalle oikoluvusta sekä työkavereilleni Jennille ja Cristianille avusta.

Espoossa 17.3.2014

Totti Tuutti



# Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhenneluettelo .....	7
Symbolit .....	7
Lyhenteet .....	8
1 Johdanto .....	9
1.1 Tausta.....	9
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajausta .....	9
1.3 Tutkimuksen toteutus.....	10
2 Lattialämmitys.....	11
2.1 Toimintaperiaate.....	11
2.2 Laatan lämpökapasiteetti .....	12
2.3 Lämmitysteho .....	13
2.4 Edut ja haasteet .....	14
3 Perinteinen lattialämmitys ja sen säätö.....	15
3.1 Toteutus .....	15
3.2 Järjestelmä .....	15
3.3 Komponentit .....	15
3.4 Lämmityksen säätö .....	16
4 Muita säätötekniikoita .....	19
5 Tilakoneeseen perustuva säätömenetelmä.....	22
5.1 Johdanto .....	22
5.2 Tilakone lämmitysprosessin ohjauksessa .....	25
6 TRNSYS-simulointiohjelmisto.....	31
6.1 Esittely.....	31
6.2 Laskentamenetelmä.....	33
6.3 Järjestelmä .....	33
6.4 Rakennus Type 56 .....	34
6.5 Säätidosto .....	37
6.6 Komponentit .....	38
6.7 Perinteisen säädön toteutus.....	46
6.8 Tilakonesäädön toteutus .....	46
7 Kevyen ja massiivisen rakennuksen lämpödynaamisia ominaisuuksia.....	48
8 Ulkolämpötila säädön häiriötekijänä .....	50
8.1 Tilakonesäädön ominaisuuksia .....	50

8.2	Säädön toiminta ulkolämpötilan muuttuessa askelmaisesti .....	52
9	Häiriöt .....	60
9.1	Häiriöiden vaikutus .....	61
9.2	Tilakonesäädön toiminta häiriötilanteessa.....	62
10	Säteily.....	64
10.1	Suora .....	64
10.2	Modifioitu suora .....	65
10.3	Tilakonesäätö .....	67
11	Häiriöt ja säteily .....	74
12	Pohdinta.....	80
12.1	Tilakonemalliin perustuva säätö .....	80
12.2	Ennakointi .....	81
12.3	Massiivisuus .....	82
13	Yhteenveto.....	83
14	Lähdeluettelo .....	84
15	Liitteet.....	86
15.1	Liite A TYPE 277 Fortran koodi.....	86

## Symboli- ja lyhenneluettelo

### Symbolit

$T$	Lämpötila
$T_m$	Menoveden lämpötila
$T_o$	Operatiivinen lämpötila
$T_s$	Säteilylämpötila
$T_u$	Ulkolämpötila
$U$	Lämmönläpäisykerroin
$V$	Tilavuus
$v$	Nopeus
$A$	Pinta-ala
$\rho_i$	Ilman tiheys
$c_p$	Ominaislämpökapasiteetti
$g$	Kokonaisläpäisykerroin
$m$	Massavirta
$\varepsilon$	Tehokkuuskerroin
$C_{min}$	Lämpökapasiteetin minimiarvo
$\alpha_s$	Säteilyn lämmönsiirtymiskerroin
$\alpha_k$	Konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin

## Lyhenteet

TRNSYS	Transient system simulation tool
FORTRAN	Formula translator
TMY2	Typical meteorological year version 2
RFH	Radiant floor heating
LRFH	Light radiant floor heating
HVAC	Heating, ventilation and air condition
MPC	Model predictive control
ANN	Neural networks
FL	Fuzzy logic
GA	Genetic algorithms
ARMAX	Autoregressive-moving-average model
MS	Microsoft
VS	Visual studio
IVF	Intel visual fortran
DLL	Dynamic link library
PNS	Pienin neliösumma
DFL	Direct feedback linear control
PMAC	Pulse modulation adaptive controller
PRAC	Pattern recognition adaptive controller
TPSC	Two parameter switching control

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

Rakennusten energiankulutus on merkittävä osa energian kokonaiskulutuksesta. Esimerkiksi vuonna 2004 rakennukset kuluttivat 37 %:a EU:n koko energiankulutuksesta [1]. Tämän vuoksi rakennusten energiatehokkuuden parantaminen on merkityksellistä ja ajankohtaista.

Diplomityö liittyy RYM-tutkimusohjelmaan, joka pyrkii kehittämään rakennuksista energiatehokkaampia ja viihtyisämpiä. Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksella on aiemmin tehty kaksi samaan hankkeeseen liittyvää diplomityötä *Simulointimalli maa- ja aurinkolämpöön perustuvalle lattialämmitysjärjestelmälle* [2] ja *Rakennuksen sähkökustannusten pienentäminen maalämpöjärjestelmän kvalitatiivisen ohjauksen avulla* [3]. Tässä työssä hyödynnetään näissä diplomitöissä rakennettua simulointiympäristöä.

Perinteisesti rakennuksen lämmitystä on säädetty muuttamalla menoveden lämpötilaa sen hetkisen ulkolämpötilan mukaan ns. avoimen säätöpiirin periaatteiden mukaan. Tästä menetelmästä käytetään myös nimitystä ulkolämpötilakompensointi. Useimmiten menetelmää täydennetään huonekohtaisilla termostaateilla. Kyseinen avoin säätö johtaa usein tilanteisiin, joissa lämmitysjärjestelmä reagoi ulkolämpötilan muutoksiin liian nopeasti välittämättä rakennuksen omasta kyvystä hidastaa muutosta. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty useita eri säätötapoja ja yksi niistä on mallipohjainen prediktoiva säätö, joka on ajankohtainen tutkimuskohde [4].

Vuonna 2008 julkaistu artikkeli *A state machine approach in modelling the heating process of a building* esittelee Pakasen ja Karjalaisen kehittämän ns. tilakoneeseen perustuvan lämpödynaamisen mallin [5]. Ko. artikkelissa mallia käytetään rakennuksen lämmitystehon prediktointiin, mutta pienin muutoksin sitä voidaan soveltaa myös lämmityksen säädön ohjaukseen. Tässä diplomityössä ko. malliin perustuvan säätömenetelmän avulla ohjataan vesikiertoisen lattialämmityksen menoveden lämpötilaa simuloidussa rakennusympäristössä. Menetelmä ottaa huomioon rakennuksen yksilölliset lämpödynaamiset ominaisuudet ja säätekijöiden vaikutuksen rakennukseen. Malli eroaa muista aikaisemmin esitetyistä mallipohjaisista prediktoivista säädöistä sen ns. tilakoneeseen perustuvan ratkaisun ansiosta.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

Diplomityössä demonstroidaan tilakonemalliin perustuvaa lämmityksen ohjausta simuloidussa rakennuksessa erilaisten ulkoisten ja sisäisten kuormitusten vallitessa. Lisäksi menetelmää verrataan perinteiseen ulkolämpötilakompensointiin, ottaen huomioon erot meno- ja

paluuveden lämpötiloissa, sisälämpötiloissa ja energiankulutuksessa. Tavoitteena on myös selvittää molempien menetelmien käyttäytymistä kevyillä ja raskailla rakenneratkaisuilla, joiden erot liittyvät rakenteiden ominaisuuteen varastoida lämpöä. Kevyt tai raskas rakenne on sijoitettu eristekerroksen sisäpuolelle joko lattiaan tai huoneen seiniin ja kattoon, tai molempiin.

Johdannossa käsitellään lattialämmitysjärjestelmää, säätökäyrään perustuvaa säätötapaa ja tutkimuksessa tarkasteltavaa tilakoneeseen perustuvaa lämpödynaamista menetelmää sekä lattialämmitykseen kehitettyjä muita säätömenetelmiä.

### **1.3 Tutkimuksen toteutus**

Tutkimuksen toteutuksessa sovelletaan TRNSYS-simulointiohjelmistoa. TRNSYS on simulointiympäristö, jota käytetään pääasiassa rakennus-, sähkö-, ja lämpötekniikan järjestelmien energiavirtojen dynaamiseen simulointiin [6]. Tutkimusaineistoon kuuluu kahden aiemman diplomityön [2, 3] rakennukset sisältäen talotekniset järjestelmät, jotka on toteutettu myös TRNSYS-simulointiympäristössä. Tässä diplomityössä simuloituja rakennuksia ja järjestelmiä on modifioitu työn kannalta tarkoituksenmukaiseksi.

TRNSYS-simulointiympäristössä lattialämmitysjärjestelmän ohjaukseen suunniteltiin uusi, komponenttikirjastosta puuttuva ns. TYPE-tietokoneohjelma, joka suorittaa menoveden lämpötilan säädön, so. ulkolämpötilakompensoinnin tilakoneen avulla. TRNSYS 17 luo automaattisesti TYPE-ohjelman rungon, jota täydennetään tilakonesäädön vaatimilla toiminnoilla. Ohjelman kirjoittamiseen käytettiin Fortran 95 ohjelmointikieltä. Näin aikaansaatu TYPE-ohjelma käännetään Intel Visual Fortran Composer XE2011:lla ja MS Visual Studio 2008:lla.

## 2 Lattialämmitys

### 2.1 Toimintaperiaate

Lattialämmityksessä lattiarakenne toimii lämmönsiirtimenä. Lattiaa lämmitetään ja lattia siirtää lämmön rakennukseen. Lattiarakenteen lämmitys voidaan toteuttaa joko ilma- tai nestekiertoisena tai sähkövastuksilla. Nesteinä käytetään usein vettä, sen lämpöominaisuuksien ja turvallisuuden takia. Lattialämmityksessä lämmönsiirtimen suuren pinta-alan vuoksi voidaan käyttää matalampaa pintalämpötilaa kuin esim. perinteisissä ikkunan alle sijoitettavissa lämpöpattereissa. Tästä on hyötyä esim. käytettäessä lämmönlähteenä maalämpöä. Vesikiertoisessa lattialämmitysjärjestelmässä kiertävän nesteen tyypillinen lämpötila on 30-40 °C. Lattialämmityksessä säteilylämmön osuus on 50-60 % kokonaislämmönsiirrosta [7]. Lattialämmitystä nimitetäänkin usein säteilylämmitykseksi. Tämän ominaisuuden ansiosta voidaan sisälämpötilan arvoa laskea, pitäen kuitenkin operatiivinen lämpötila samana verrattuna patterilämmitteiseen rakennukseen. Kun sisäilman lämpötila on alhaisempi, vähenee ilman pyörteisyys ja sisäilmaolosuhteet paranevat. Operatiivinen lämpötila on lämpötila, joka lasketaan ilman lämpötilan ja lähellä olevien säteilylämmönlähteiden avulla yhtälön 1 mukaan.

$$T_0 = aT_i + (1 - a)T_s \quad (1)$$

jossa

$T_0$  on operatiivinen lämpötila

$a=0,5$  kun  $v<0,24$

$a=0,6$  kun  $v=0,2...0,6$

$a=0,7$  kun  $v=0,6...1,0$

$v$  on ilman suhteellinen nopeus kehoon nähden (m/s)

$T_i$  on ilman lämpötila (°C)

$T_s$  on keskimääräinen säteilylämpötila (°C)

Operatiivinen lämpötila kertoo normaalia sisälämpötilaa paremmin miltä sisälämpöolosuhteet oikeasti tuntuvat [7].

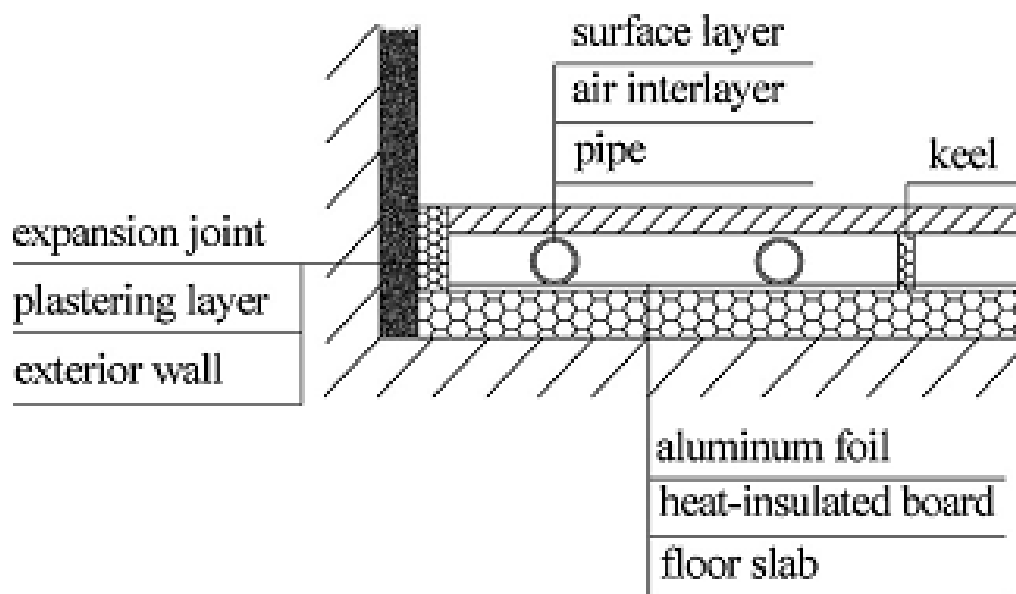
Kun lattialaattaa lämmitetään lämmitysputkilla, laatta ei lämpene tasaisesti. Laatta lämpenee eniten putkien kohdalta. Kylmin paikka laattassa on lämmitysputkien välissä. Lisäksi lämmitysveden lämpötila on paikkariippuvainen lämmityspiirissä. Mitä pidemmälle lämmitysvesi on piirissä kiertänyt, sitä enemmän se on lämpöä luovuttanut ja sitä matalampi nesteen lämpötila on. Tämä aiheuttaa ongelmia lämmön epätasaisessa jakautumisessa. Lämpötilaeroja pyritään tasoittamaan asentamalla lämmitysputket niin, että juuri

lämmityspiiriin tulleen lämpimän nesteen vieressä kulkee poispäin menevä viileä vesi. Todellisuudessa laatassa on aina lämpötilaeroja [8].

## 2.2 Laatan lämpökapasiteetti

Lattialämmitys voidaan toteuttaa joko massiivisessa lattialaatassa, kevytrakenteisessa lattiassa tai kevytrakenteisesti raskaan laatan päälle. Massiivisessa lattialämmitysjärjestelmässä lämmityspotket tulevat laatan sisään. Laatan materiaalina käytetään usein betonia. Putket siirtävät lämmön laattaan ja laatasta lämpö siirtyy säteilyn ja konvektion avulla sisäilmaan.

Kevytrakenteisessa lattialämmitysjärjestelmässä putket tulevat kantavan välipohjan päälle. Putkien alle sijoitetaan eriste ja alumiinipaperi, joka vähentää lämpöhukkaa ja estää lämmön kulkeutumisen alapuolella olevaan lattiarakenteeseen. Järjestelmässä putkissa voi kiertää nesteen sijasta lämmin ilma. Kuva 1 kuvaa järjestelmän rakennetta.



**Kuva 1 Kevyt säteilylattialämmitys LRFH [8]**

Tällaista lämmitysjärjestelmää kutsutaan kevyeksi säteilylattialämmitykseksi (LRFH). Siinä lämpö siirtyy putkista yläpuoliseen lattiarakenteeseen ja lattiarakenteesta sisäilmaan. Erona raskaaseen lattiaan on lämmönsiirtimenä toimivan lattian pieni lämpökapasiteetti ja nopeus.

Julkaisussa [8] on esitelty tutkimus kevyen lattialämmityksen lattian pintalämpötiloista. Tutkimuksessa käytetty järjestelmä on kuvassa 1. Putkien välimatkaksi tutkimuksessa on valittu 100 mm. Kokeellisesti määritetyt pinnan lämpötilat (°C) on esitetty taulukossa 1 [8].



Y-axis (m)	X-axis (m)						
	-1.25	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.25
-1.25	-	-	27.4	29.4	29.4	26.4	28.2
-1.0	22.0	21.8	27.2	28.4	28.8	26.8	26.8
-0.5	27.6	27.8	27.4	27.4	27.2	30.4	29.0
0	22.6	23.2	23.8	28.4	27.4	26.8	25.4
0.5	28.4	29.2	27.4	26.2	26.4	28.2	24.6
1.0	27.8	29.6	27.8	29.0	28.8	27.6	22.8
1.25	28.4	28.8	29.8	29.8	28.8	28.8	21.4

### Taulukko 1 Laatan lämpötilaerot [8]

Kuten taulukosta 1 nähdään, tutkimuksessa saatiin laatan pintalämpötiloille melko suuri ero testipisteiden välillä. Suurin erotus oli 9 °C, lattialämmityslaatta ei siis käyttäydy isotermisesti [8].

Laatan lämpökapasiteetti vaikuttaa lattian käyttäytymiseen lämmönlähteenä. Jos laatalle on suuri lämpökapasiteetti, se lämpenee ja jäähtyy hitaammin kuin pienen lämpökapasiteetin lattia. Lämpötilaerot laatussa ovat myös pienempiä raskaalla lattialämmitysjärjestelmällä kuin kevyellä lattialämmitysjärjestelmällä [9].

## 2.3 Lämmitysteho

Lämmitysteho määräytyy laatan lämpötilan ja sisäilman lämpötilan mukaan. Lattian lämmönluovutus saadaan sisälämpötilan, keskimääräisen laatan pintalämpötilan ja lattian lämmönsiirtymiskertoimien yhtälön 2 mukaan.

$$q = (\alpha_s + \alpha_k) * (T_p - T_s) \quad (2)$$

jossa

$\alpha_s$  on säteilyn lämmönsiirtymiskerroin

$\alpha_k$  on Konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin

$T_p$  on laatan lämpötila

$T_s$  on sisäilman lämpötila

Säteilyn lämmönsiirtymiskerroin  $\alpha_s$  riippuu huoneen muiden pintojen lämpötilasta. Se on arvoltaan 6-7 W/m<sup>2</sup>K [7].

Konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin  $\alpha_k$  riippuu pinnan asennosta ja huoneen ilmavirtauksista. Se on arvoltaan 4-5 W/m<sup>2</sup>K [7].

Tutkimus lattialämmitykseen liittyvistä lämmönsiirtokertoimista on esitelty julkaisussa [10], jossa määritettiin lattialämmitykseen liittyviä kertoimia kokeellisessa tilanteessa. Tutkimuksen mukaan yleisesti käytössä olevat arvot ovat yleensä yliarvioituja 10-30 %. Tutkimuksessa säteilyn lämmönsiirtymiskertoimeksi saatiin määritettyä 5,4-6,2 W/m<sup>2</sup>K. Konvektiiviseksi

kertoimeksi saatiin 2,2-3,4 W/m<sup>2</sup>K. Kertoimet ovat selkeästi pienempiä kuin kirjallisuuden antamat arvot [10].

Lämmitystehon säätö tapahtuu menoveden lämpötilaa säätämällä. Lisäksi lämmitystä säädetään huonetermostaateilla ja laatan termostaatilla, joka estää laatan pintalämpötilaa nousemasta liian korkeaksi. Termostaatit rajoittavat lattialämmitysjärjestelmään virtaavan veden massavirtaa ja näin säättävät lattian lämpötilaa. Laatan pintalämpötila ei saisi viihtyisyys syistä nousta yli 29 °C [11].

## **2.4 Edut ja haasteet**

Etuna lattialämmityksessä on, ettei erillisiä lämmönsiirtimiä tarvita, vaan lattialaatta toimii yhtenä isona lämmönsiirtimenä. Lattialämmityksessä lämmönsiirtimen pinta-ala on suuri, joten ei tarvita suuria pintalämpötiloja riittävän lämmitystehon saamiseksi. Kun lämmönsiirtimen ja sisäilman lämpötilojen erotus on pieni, vaikuttaa huoneilman lämpötilan muutos suhteellisesti enemmän lämmitystehoon kuin tilanteissa, jossa lämmönsiirtimen lämpötila joudutaan pitämään korkeana esim. patterilämmitys. Lattialämmitys säättää siis itseään paremmin kuin patterilämmitys [7].

Suuren lämmityspinta-alansa ansiosta lattialämmityksessä tarvittava lämmitysveden lämpötila on alhaisempi kuin patterilämmityksessä. Lämmönlähteen lämpötila ei täten tarvitse olla niin korkea ja ns. matalalämpöisten lämmönlähteiden käyttö on mahdollista.

Myös lämpötilajakauma pystysuunnassa on ihmisille sopiva, joten keskilämpötilaa voidaan laskea. Lattiaan ollaan usein kosketuksissa, jolloin lämmön tunne lisääntyy. Ihminen tuntee sisäolosuhteet mukavampana, jos jalat ovat lämpimämmässä kuin pää [7]. Lattialämmityksellä tämä onnistuu luonnostaan. Jos lattialaatta on massiivinen, saadaan siihen varastoitua energiaa. Tämä tasaa lämpötilan vaihteluita.

Lämmitysjärjestelmän asennus on yksi lattialämmityksen haasteista. Lattialämmitys sijoitetaan rakenteiden sisään. Järjestelmän rakentaminen on ylimääräinen työvaihe, josta aiheutuu kustannuksia ja viivettä. Edellä mainituista syistä vesikiertoisen lattialämmitysjärjestelmän asennus jo valmiina olevaan kohteeseen on vaikeaa ja kallista. Putkien tiiviiden epävarmuus aiheuttaa myös huolta.

Lattialämmityksen energiankulutuksessa yksi ongelma on lämpöhäviöt, joita esiintyy varsinkin alaspäin. Toimiakseen energiatehokkaasti lattialämmitys vaatii putkien alle hyvän eristyksen.

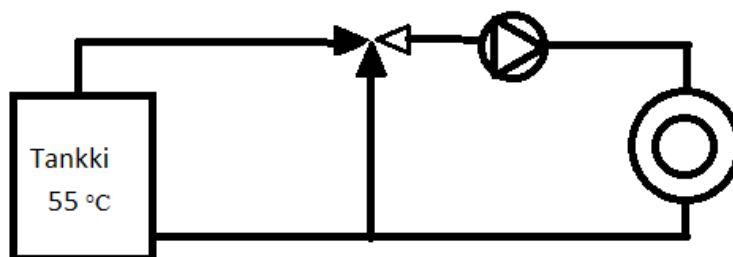
## 3 Perinteinen lattialämmitys ja sen säätö

### 3.1 Toteutus

Perinteinen lämmityksen säätö perustuu menoveden lämpötilan ohjaukseen ulkolämpötilan mukaan. Tämän ns. ulkolämpötilakompensoinnin lisäksi huonetermostaatit säätävät lämmitystehoa huonekohtaisesti rajoittamalla lämmitysveden massavirtaa lämmityspiirissä. Tutkimuksessa huonetermostaatit on jätetty vertailun helpottamisen vuoksi pois, mutta ne olisivat voineet olla myös mukana. Ulkolämpötilan ja lämmitysveden lämpötilan välille on luotu lineaarinen riippuvuus, jota on approksimoitu ns. säätösuoran avulla. Tutkimuksessa on käytetty varaavaa vesikiertoista sähkölämmitystä. Kuvassa 2 on kuvattu yksinkertainen vesikiertoinen sähkölämmityspiiri, jossa on tankki, 3-tieventtiili, pumppu ja lämmityspiiri.

### 3.2 Järjestelmä

Lämmitysveden lämpötilan säätö on usein toteutettu termostaattiventtiilillä, joka sekoittaa kuumaa lämmönlähteestä tulevaa vettä ja lattialämmityspiiristä palaavaa vettä sopivassa suhteessa. Se säätää menoveden lämpötilaa pitäen vesivirran lämmityspiirissä vakiona. Termostaattiventtiilille annetaan ohjaussignaalina haluttu lämmitysveden lämpötila. Järjestelmä vaatii myös tankin, jossa lämmönsiirto nesteeseen tapahtuu, ja joka kykenee varastoimaan lämpöä. Tankin sähkövastukset pyrkivät pitämään lämpötilan tankissa termostaatin avulla vakiona. Pumpun tehtävä on luoda paine-ero, jonka seurauksena vesi kiertää piirissä halutulla massavirralla.



Kuva 2 Lämmitysjärjestelmä

### 3.3 Komponentit

#### 3.3.1 Termostaattiventtiili

Kuvassa 2 termostaattiventtiilinä toimii 3-tieventtiili, jonka karaa liikuttamalla vesivirtoja voidaan ohjailla. Venttiiliin asennettu termostaatti säätää menoveden lämpötilan oikeaksi. Karaa liikutetaan yleisesti sähkömoottorin avulla. Venttiilin valinnassa tulisi pyrkiä siihen, että vesivirran ja lämpötilan välillä olisi mahdollisimman lineaarinen yhteys, tällöin

toimintaedellytykset säädössä ovat parhaat koko säätöalueella. Lämmöntarpeen muuttuessa venttiililtä vaaditaan laajaa säätöaluetta [7].

### 3.3.2 Tankki

Tankki toimii sekä energiavarastona että lämmönlähteenä. Tankin ominaisuudet riippuvat paljon siitä mitä energiamuotoa käytetään lämmönlähteenä ja miten energian varastointi on toteutettu. Ko. järjestelmässä tankki on sähkökattila. Tankissa on sähkövastus, joka pyrkii pitämään nesteen lämpötilan säädetyssä arvossa termostaatin avulla. Energiavarastona toimii tankissa oleva neste.

### 3.3.3 Pumppu

Yleisesti lämmitystekniikassa käytetty pumppu on kineettinen pumppu, jossa paine syntyy keskipakovoiman johdosta. Pumpussa on siipipyörä, joka pyöriessään antaa vedelle kineettistä energiaa, joka muuttuu painenergiaksi. Pumppu valitaan lämmityspiirin ominaiskäyrän ja vaaditun virtaaman mukaan.

### 3.3.4 Neste

Varaavassa nestekiertoisessa sähkölämmityksessä lämpö varataan usein veteen, koska vesi on turvallinen vaihtoehto: se on myrkytön ja hajuton, veden lämpökapasiteetti on hyvä ja sitä voidaan käyttää lämmönjakelussa.

## 3.4 Lämmityksen säätö

### 3.4.1 Periaate

Rakennuksen lämmitystehon tarve on karkeasti ottaen lineaarisesti riippuvainen ulkoilman lämpötilan ja sisälämpötilan erotuksesta. Tämä pätee vain staattisessa tilanteessa, jossa ei ole mukana sisäisiä lämmönlähteitä eikä auringon säteilyä. Rakennuksen ja lämmitysjärjestelmän ominaisuuksista johtuen lattialämmityksen menoveden lämpötila ei ole kuitenkaan lineaarinen ulkolämpötilan funktio [7]. Koska funktion todellista käyrämuotoa ei tunneta, useimmat säätölaitteet on tehty niin, että menoveden lämpötilaa ( $T_m$ ) ohjataan ulkolämpötilan ( $T_u$ ) funktiona ja näiden muuttujien keskinäistä riippuvuutta approksimoidaan suoran yhtälön avulla (yhtälö 3).

$$T_m = a T_u + b \quad (3)$$

jossa

a ja b ovat vakioita

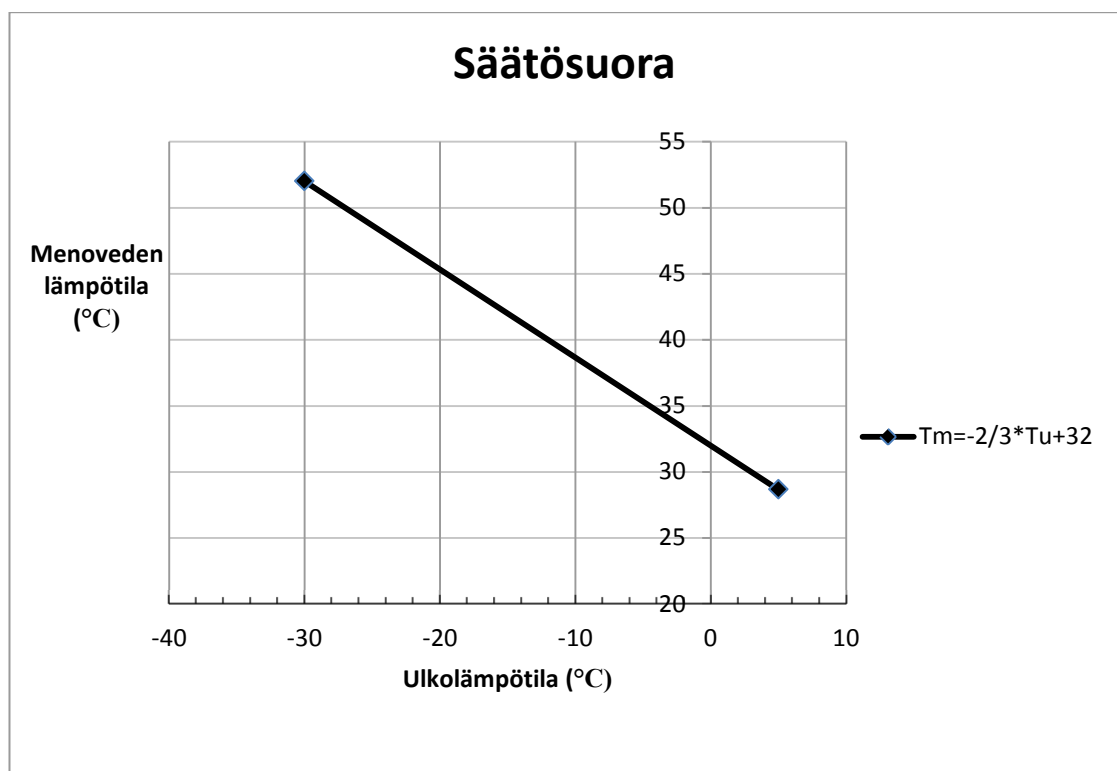
$T_m$  on menoveden lämpötila

$T_u$  on ulkolämpötila

Käytännön säätölaitteissa suoran kulmakerrointa ja vakioarvoa voidaan muuttaa. Approksimaatiosta aiheutuu virhettä menoveden lämpötilaan. Sillä ei ole kuitenkaan merkitystä, koska sisälämpötilaa säädetään erikseen termostaatin/termostaattien avulla.

### 3.4.2 Säättösuoran valinta

Oikean säättösuoran valinta on vaikeaa, koska kokeilu todellisessa tilanteessa on haastavaa, säättösuoran parametreja ei voi laskea ennalta ja häiriötekijöitä on paljon. Säättösuora ei myöskään ole sama kaikissa tilanteissa. Sisäiset lämmönlähteet, auringon säteily ja rakennuksen massiivisuus aiheuttavat sen, että rakennuksen tehontarve on erilainen eri tilanteissa, vaikka ulkolämpötila olisikin sama. Kuvassa 3 on säättösuora  $T_m = -2/3 \cdot T_u + 32$ .



**Kuva 3 Säättösuora  $T_m = -2/3 \cdot T_u + 32$**

Kuvasta näkee kuinka menoveden lämpötila kasvaa suuremmaksi ulkolämpötilan laskiessa. Suoralle on myös usein säädetty minimi- ja maksimiarvot järjestelmän rajoitusten mukaan. Kuvassa olevassa suorassa maksimiarvo on säädetty 52,0 °C ja minimiarvo 28,7 °C.

Jos lämmitysteho ei ole kovilla pakkasilla riittävä, säädetään suoran kulmakerrointa itseisarvoltaan suuremmaksi, ja pienemmäksi, jos lämmitysteho on liian suuri kovilla pakkasilla. Jos taas lämmitysteho ei ole oikea koko ulkolämpötilaskaalan välillä, muutetaan vakion arvoa.

### **3.4.3 Sääennusteen hyödyntäminen**

Muutamat yritykset markkinoivat kiinteistöihin tarkoitettuja säätölaitteita, jotka pystyvät muuttamaan suoran asentoa tilanteen mukaan. Ne siirtävät yhdensuuntaisesti säätösuoraa muuttamalla vakion arvoa tietyissä tilanteissa. Tätä ominaisuutta käytetään haluttaessa ennakoida lämmityksen tehontarvetta tiedossa olevan sään muutoksen takia. Tällöin lämmityksen ennakkoinnissa hyödynnetään mm. ulkolämpötilan ennustetietoja, joita voidaan lukea suoraan sääpalveluita tarjoavien yritysten palvelimelta.

### **3.4.4 Edut ja haitat**

Säätösuoraan perustuva ulkolämpötilakompensointi toimii moitteetta häiriöttömässä tilanteessa, kun ainoastaan ulkolämpötila vaikuttaa tarvittavaan lämmitystehoon. Todellisuudessa häiriöitä on paljon: sisäiset lämmönlähteet, auringon säteily, ilmanvaihdon muutokset jne. Myös rakennuksen lämpökapasiteetti vaikuttaa tarvittavaan hetkelliseen lämmitystehoon. Todellisessa tilanteessa lämmitysteho ei ole aina kohdallaan ja saattaa näkyä energiankulutuksen kasvuna tai epätydyttävänä sisäilmaolosuhteina.

## 4 Muita säätötekniikoita

Lämmityksen säädön tavoitteena on aikaansaada hyvät sisäolosuhteet mahdollisimman vähällä energiankulutuksella. Lämmitystä säädetään sekä primääritasolla että paikallisesti. Tällä tarkoitetaan lämmitysjärjestelmän säätöä kokonaisuudessaan tai huonetasolla esim. menoveden lämpötilan säätö (primääritaso) ja huonetermostaatit (paikallinen taso). Osa säätömenetelmistä toimii ainoastaan paikallisella tasolla, osa primääritasolla ja osa molemmilla. Tässä tutkimuksessa on keskitytty ainoastaan primäärisäätöön. Katsauksessa [4] HVAC järjestelmien säätö on jaettu viiteen osaan: klassiseen säätöön, kovaan säätöön, pehmeään säätöön, hybridisäätöön ja muihin säätömenetelmiin (kuva 4) [4].

Tässä tutkimuksessa käytetty lineaarinen säätö (säätösuoran avulla tapahtuva säätö) kuuluu perinteisesti klassisiin säätömenetelmiin. Yleisesti käytössä oleva säätösuoraan perustuva säätötapa on esitelty erikseen osiossa Perinteinen lattialämmitys ja sen säätö. Klassiseen säätöön kuuluvat myös on/off-säätö ja pid-säätö. Kovalla säädöllä tarkoitetaan aikataulutettua pid-säätöä, ei lineaarista säätöä, robustia säätöä, optimoitua säätöä ja mallipohjaista prediktoivaa säätötapaa. Fuzzy-logiikka ja neuroverkot muodostavat pehmeän säätötavan. Hybridisäädössä yhdistellään kovia ja pehmeitä säätötapoja. Yhdistelmiä ovat mm. korjaava fuzzy, korjaava neuro, Fuzzy PID. Muita säätötapoja ovat mm. DFL-säätö (Direct feedback linear control), PMAC-säätö (Pulse modulation adaptive controller), PRAC-säätö (Pattern recognition adaptive controller), Preview-säätö, TPSC-säätö (Two parameter switching control) ja vahvistava oppivasäätö (Reinforcement learning control) [4].

### 4.1.1 Mallipohjainen prediktoiva säätö

Mallipohjaisen prediktoivan säätömenetelmän (Model predictive control, MPC) etuja ovat mm. ennakkoinnin mahdollisuus, mahdollisuus ottaa useat eri häiriöt huomioon ja kyky säätää systeemiä sekä primääritasolla että paikallisella tasolla [4]. MPC-säädössä luodaan ensimmäiseksi systeemin dynaamista käyttäytymistä kuvaava malli keräämällä mittaustietoa prosessin toiminnasta ja identifioimalla malli hyödyntäen kerättyä dataa. Prediktointi tapahtuu tehdyn mallin ja tulotietojen avulla. Prediktointivaiheessa säätöä ohjataan mallin mukaisesti ja korjataan tulotietojen avulla. Prediktoinnilla tarkoitetaan mallin korjaamista paremmaksi, jonkun sisääntulevan informaation avulla. Identifioinnilla tarkoitetaan prosessin mallirakenteen ja parametrien määrittämistä datapohjaisesti mitattujen tulo- ja lähtösignaalien perusteella. Identifioinnissa parametrit estimoidaan mittausten perusteella käyttäen esim. pienimmän neliösumman menetelmää tai sen johdannaisia. Identifioinnissa siis luodaan prosessista malli, joka käyttäytyy samoilla sisääntulosignaaleilla kuten todellinen

prosessi. Identifiointiin kuuluu lisäksi mallin validointi, jossa testataan mallin toimivuus ja yleistettävyyttä. Identifiointissa on tärkeää saada järjestelmästä tietoa mahdollisimman laajalta taajuusalueelta, jotta tiedetään miten prosessi kokonaisuudessaan käyttäytyy ja saadaan mahdollisimman laaja käytettävyyalue identifiointille. Identifiointia vaikeuttaa järjestelmässä tuntemattomat häiriöt, jotka muuttavat signaalien arvoja. Tällöin malli oppii väärin eikä käyttäydy samoin kuin identifiointin kohteena oleva prosessi. [12,13] Toimivan prosessimallin kehittäminen on malliprediktiivisen säädön aikaavievin ja haasteellisin osuus [14]. Yleisimmin käytetyt menetelmät ovat pienimmän neliösumman menetelmä [15] ja erilaiset aikasarja-analyysit [16].

#### **4.1.2 Neuroverkot**

Neuroverkot perustuvat laskentaan, jossa ilmiöitä mallinnetaan erilaisin graafi- ja verkkomallein. Neuroverkkoajattelu on lähtöisin ihmisaivojen toiminnan ja matemaattisen logiikan yhdistelemisestä. Perusajatuksena on jäljitellä luonnollisia hermoverkkoja. Nykyisin pyritään luomaan verkot perustuen enemmän tilastotieteeseen ja signaalinkäsittelyn teoriaan kuin luonnossa esiintyviin hermoverkkoihin. Neuraalilaskenta muistuttaa pääosin tilastotieteessä käytettyjä yleistettyjä lineaarisia malleja. Niissä mallin systemaattinen osa on lineaarinen, mutta linkkifunktion rajoitukset ovat ainoastaan monotonisuus ja derivoituvuus. Neuraaliverkkojen oppimisvaihe eroaa muista järjestelmistä. Neuroverkko pyrkii oppimaan muuttujien epälineaariset riippuvuussuhteet suoraan havaintoaineistosta [17].

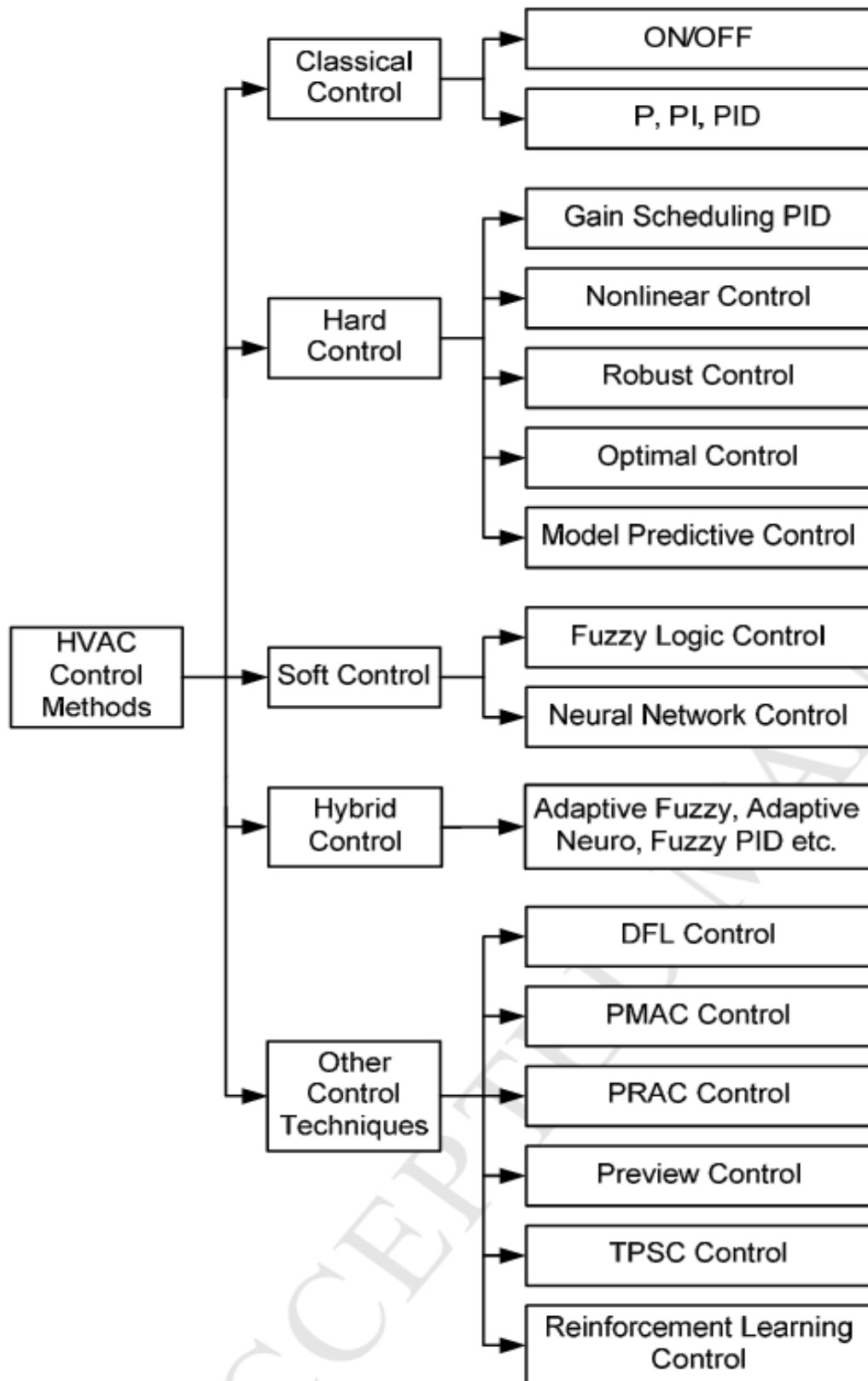
#### **4.1.3 Geneettiset algoritmit**

Geneettisten algoritmien avulla pyritään löytämään optimoitu ratkaisu evoluutiobiologiasta tuttujen periytymisen, mutaatioiden ja rekombinaatioprosessien mukaisesti. Geneettinen algoritmi esittää ratkaisut kromosomeina. Aluksi synnytetään joukko, populaatio, johon aletaan kohdistaa muutoksia. Tietyillä etukäteen määritetyillä ehdoilla karsitaan heikot ratkaisut pois. Tätä jatketaan kunnes tyydyttävä ratkaisu löydetään. Geneettisissä algoritmeissa ei jäljitellä täysin luonnon evoluutiota, vaikka ne ovatkin kehitetty Darwinin evoluutioteorian pohjalta. Geneettiset algoritmit ovat luonnossa esiintyviä evoluutiota yksinkertaisempia [18].

#### **4.1.4 Fuzzy logic**

Fuzzy-logiikka (FL) perustuu jos-sitten-muutoin väittämiin. Fuzzy-logiikkaa voidaan käyttää sekä primääritasolla että sekundääritasolla. Esimerkkejä Fuzzy-logiikasta ovat predicted mean vote (PMV), joka perustuu termiseen mukavuuden säätöön ja three-level hierarchical supervisory-FL -säädin [4].





Kuva 4 Säättömenetelmät [4]

## **5 Tilakoneeseen perustuva säätömenetelmä**

Useat aikaisemmin kehitetyt mallit etsivät parametriarvoja monimutkaisilla algoritmeilla. Näiden hallinta vaatii ammattitaitoa ja laitteilta suurta suorituskkyä. Usein joudutaan tekemään suuria yksinkertaistuksia koneiden suoritustehon ja informaation vähyyden vuoksi. Tutkimuksessa käytetty malli eroaa aikaisemmista sen tilakoneeseen perustuvan ratkaisumenetelmän ansiosta.

Malli pohjautuu digitaalitekniikassa paljon käytettyyn Mealyn koneeseen. Jotta mallin ymmärtäminen on mahdollista, täytyy digitaalitekniikan perusteet tuntea. Seuraavissa kappaleissa on selvennetty mallin toimintaa ja annettu mallille teoreettinen pohja.

### **5.1 Johdanto**

#### **5.1.1 Kombinaatiopiirit**

Digitaalitekniikka jaetaan usein kahteen osaan, kombinatoriseen logiikkaan ja sekventiaaliseen logiikkaan. Erona logiikoilla on, että kombinatorisessa logiikassa ei käytetä muistia vaan kaikki tulokset riippuvat sen hetkisistä tuloista. Sekventiaalisessa logiikassa myös edellisillä tuloilla on merkitystä laskettaessa lähtötietoja [19].

#### **5.1.2 Sekvenssiipiirit**

Sekventiaalilogiikassa piirillä on eri tiloja, joissa se käyttäytyy eri tavalla. Tämä ominaisuus mahdollistaa monimutkaisemmat sovellukset kuin kombinaatiopiirit. Piirissä pitää siis olla jokin komponentti, joka muistaa edellisen tulosignaalin. Se on toteutettu erilaisilla takaisinkytkennöillä ja lukkopiireillä [20].

Sekvenssiipiirit ovat digitaalisia piirejä, joiden toimintaan vaikuttavat myös aikaisemmat tulotiedot. Ne siis muistavat. Se erottaa ne yksinkertaisista kombinaatiopiireistä. Sekvenssiipiirien muistiominaisuus mahdollistaa huomattavasti monipuolisemmat mahdollisuudet toteuttaa laitteita ja järjestelmiä [19].

Sekvenssiipiirit jaetaan synkronisiin ja asynkronisiin sekvenssipiireihin. Asynkrosissä piireissä tilanmuutokset tapahtuvat heti kun signaali on edennyt komponentin läpi. Synkronisen piirin tilan muutokset tapahtuvat vain kellosignaalin määrääminä ajankohtina. Synkronisten komponenttien suunnittelu on asynkronisten piirien suunnittelua helpompaa, sillä synkronisten toiminnassa ei tapahdu odottamattomia viiveitä niin helposti ja tilat eivät mene sekaisin. Synkronisten piirien käyttö on huomattavasti yleisempää [19].

### 5.1.3 Tilakone

Tilakone on synkroninen sekvenssiipiiri, jonka tilasiirtymälogiikkaan voi vaikuttaa ohjaustuloilla [19]. Tilakone on abstrakti kone, joka ottaa tietoa vastaan tulotietona ja antaa lähtötietona tietyn ulostulosignaalin. Tilakoneella on eri tiloja, joilla se käyttäytyy eri tavalla. Tilasiirtymät tapahtuvat tilasiirtymälogiikan mukaan. Tilasiirtymälogiikkaan vaikutetaan ohjaustuloilla. Tilanteissa, joissa järjestelmän toiminta on helppo mieltää jonona tilasiirtymästä toiseen, on tilakone hyvä apuväline [21].

Tarve tilakoneelle voidaan jakaa kolmeen hyötyyn, joita tilakoneella saavutetaan. Ensimmäinen on tilakoneen mahdollisuudet ratkaista laajasti erilaisia käytännön ongelmia virtapiireissä. Toinen hyöty on, että tilankonesuunnittelulla saavutetaan usein yksinkertaisimmat ja toteutettavimmat ratkaisut. Viimeiseksi hyödyksi voidaan lukea tilakoneen ongelmien ratkaisukyky sekvenssiipiireissä usein esiintyviin ongelmiin [22].

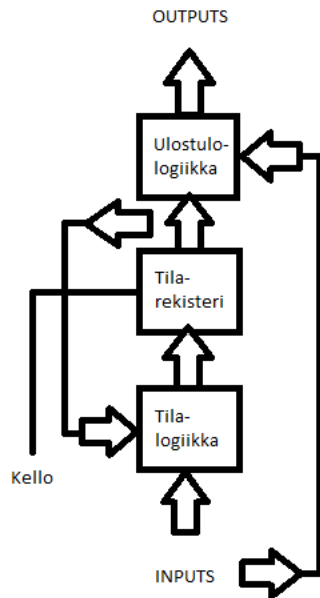
Tilakoneet jaetaan kahdenlaisiin koneisiin: Mooren kone ja Mealyn kone, jotka on nimetty keksijöidensä mukaan Edward Mooren ja George Mealyn mukaan [20].

#### 5.1.3.1 Mooren kone

Jos sekvenssiipiirin lähtösignaalit riippuvat pelkästään tilasignaaleista, kyseessä on Mooren kone [19]. Mooren kone on muuten tavallinen synkroninen sekvensseri, mutta tilasiirtymiin vaikutetaan piiriin tulevilla ohjaustuloilla. Mooren koneessa tila sisältää kaiken tarvittavan tiedon lähtötiedon aikaansaamiseksi. Yksi tila voi saada vain yhdenlaisen toiminnan [20].

#### 5.1.3.2 Mealyn kone

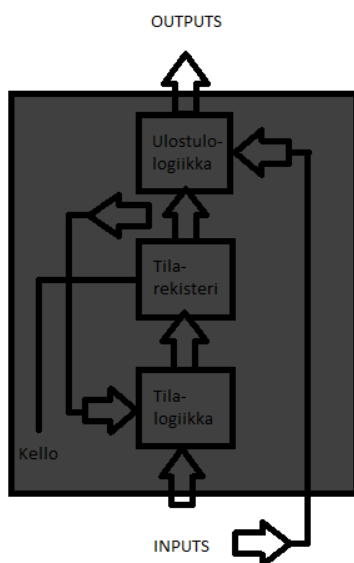
Jos sekvenssiipiirin lähtösignaalit riippuvat tilasignaalien lisäksi tulosignaaleista, kyseessä on Mealyn kone [19]. Mealyn koneessa ohjaustuloilla ohjaillaan koneen tilasiirtymiä, mutta ohjaustulot ovat myös ulostulojen ohjauslogiikan käytettävissä. Tämä johtaa siihen että sama tila voi aikaansaada eri lähtötietojen arvoja eri tulotiedoilla. Tarvittavien tilojen määrä on Mealyn koneessa usein pienempi kuin Mooren koneella. Mealyn koneella voidaan kaikki synkroniset kytkennät esittää. Mooren kone on yksi Mealyn koneen erityistapaus ja synkroninen sekvensseri yksi Mooren koneen erityistapaus [20]. Mealyn koneen logiikka on esitetty seuraavalla sivulla kuvassa 5.



**Kuva 5 Mealyn kone**

#### 5.1.4 Blackbox

Blackboxilla tarkoitetaan digitaalilogiikassa tilakonetta, jonka sisäisiä prosesseja ei tunneta. Tiedetään kuitenkin koneen tulotiedot ja lähtötiedot. Mustassa laatikossa tapahtuu jotain mitä ei tunneta, mutta tiedetään mitä lähtötietoja se antaa tietyillä tulotiedoilla. Tutkimuksessa käytetty lämpödynaaminen malli olettaa, että rakennus käyttäytyy kuin Mealyn kone black boxissa (kuva 6).



**Kuva 6 Mealyn kone black boxissa**

## 5.2 Tilakone lämmitysprosessin ohjauksessa

### 5.2.1 Tilakoneeseen perustuva lämpödynaaminen malli

Tilakoneeseen perustuvassa menetelmässä lämmitysprosessia mallinnetaan Mealyn koneen avulla, jonka toiminnasta tiedetään tulo- ja lähtötiedot. Mallissa hyödynnetään blackbox-ajattelua eikä yritetäkään löytää systeemille eksaktia matemaattista ratkaisua. Lähtötiedot tallennetaan taulukkoon. Koneen seuraava tila määräytyy sen hetkisten tulotietojen, niiden edellisten arvojen sekä edellisten lähtötietojen perusteella [5].

Lattialämmityksen yhteydessä mallin toimintaa voidaan kuvata matemaattisesti tulotietojen ja lähtötietojen kombinaatioina, joista kuhunkin liitetään yksi uusi lähtötiedon arvo (yhtälö 4).

$$q(t) = f(q_{t-1}, q_{t-2}, \dots, q_{t-m}, u_{1,t-1}, u_{1,t-2}, \dots, u_{1,t-n}, \dots, u_{k,t-1}, u_{k,t-2}, \dots, u_{k,t-r}) \quad (4)$$

jossa

$q(t)$  on uusi kvantisoimaton lähtötieto: menoveden lämpötila

$q_{t-1}, q_{t-2}, \dots, q_{t-m}$  kvantisoitu lähtötieto, jossa  $t-1, t-2, \dots$  viittaa diskreettiin ajan hetkeen

$u_{k,t-1}, u_{k,t-2}, \dots, u_{k,t-n}$  on kvantisoitu tulotieto  $k$  diskreetteinä ajanhetkinä, esim.

sisälämpötila, ulkolämpötila, ilmanvaihto, auringon säteily, jne.

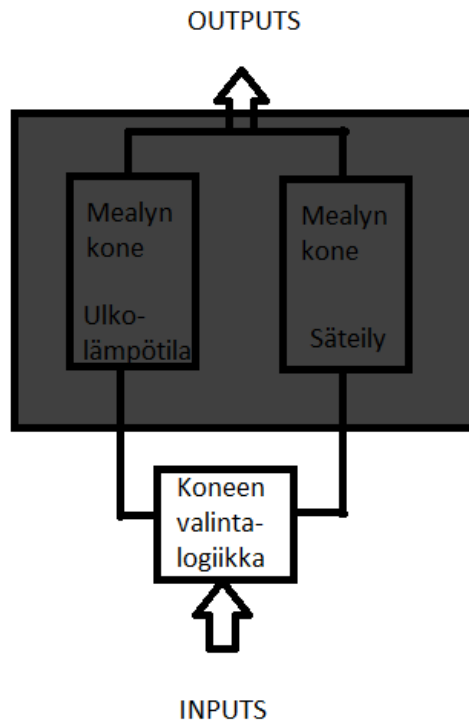
Funktiota  $f$  ei tunneta tarkasti. Kun tilakonemallia sovelletaan lattialämmitykseen, pyritään funktio  $f$  identifioimaan käyttämällä hyväksi perinteistä säätösuoraa lämmityksen ohjauksessa. Kun säätösuora ohjaa lämmitystä, sisälämpötila poikkeaa usein asetusarvostaan. Poikkeaman suuruus ja suunta vaihtelevat erilaisilla tulo- ja lähtösignaalien ja niiden edellisten arvojen yhdistelmillä, so. kulloisenkin tilan mukaan. Tämä poikkeama toimii funktion  $f$  identifioinnissa eräänlaisena kustannusfunktiona (loss function). Tutkimuksessa käytetyssä tilakonemallissa tarkastellaan siten menoveden lämpötilan  $q(t)$  lisäksi sisälämpötilan ja sen asetusarvon erotusta, jonka avulla menoveden lämpötilaa korjataan.

Mallin idea on käyttää hyväksi tietokoneen muistikapasiteettia prosessointitehon sijaan välttämällä monimutkaiset algoritmit hakemalla tulokset tallennetuista taulukoista. Tällä hetkellä muistikapasiteetti ei ole ongelma teknisesti eikä kustannuksellisesti [5].

Tutkimuksessa rakennettu malli käyttää tulotietoina ulkolämpötilaa, auringonsäteilytietoa, sisäilman lämpötilaa ja sen asetusarvoa. Lähtötietona mallista saadaan lämmitysveden menoveden lämpötila.

Malli on jaettu kahteen eri tilakoneeseen, jotka toimivat toisistaan riippumatta. Toinen koneista toimii ulkolämpötiloista tehdyn taulukon mukaisesti ja toinen säteilytiedoista koostetun taulukon perusteella. Kun auringon säteily ylittää tietyn asetusarvon malli alkaa

toimia säteilytietojen perusteella ja muulloin malli toimii ulkolämpötilatietojen perusteella. Malli sisältää kaksi erillistä Mealyn konetta, joiden avulla menoveden lämpötila määräytyy (Kuva 7). Tähän päädyttiin, koska tietojen yhdistäminen yhteen malliin osoittautui haastavaksi tulosignaalien erilaisuuden takia. Auringon säteily on systeemin kannalta hyvin hallitseva ja nopea tekijä. Ulkolämpötila taas muuttuu melko hitaasti ja vaikutus on tasainen.



**Kuva 7 Tilakoneeseen perustuvan säädön toiminta**

#### **5.2.1.1 Kvantisointi**

Tilakonemallissa käsitellyt tulo- ja lähtösignaalit kvantisoidaan ennen niiden tallentamista. Kvantisoinnissa tietoa pelkistetään. Tiedolle annetaan tietty määrä vaihtoehtoja, joita kvantisoitavan signaalin sallitaan saavan. Näitä arvoja kutsutaan kvantisointitasoiksi. Tasavälisessä kvantisoinnissa kvantisointitasot ovat yhtä etäällä toisistaan. Kvantisointi yksinkertaistaa ja helpottaa tiedon lukemista ja tallentamista ja vähentää tallennuskapasiteetin tarvetta. Muunnosprosessissa menetetään aina osa tiedosta. Kvantisoinnissa syntynyttä virhettä kutsutaan kvantisointivirheeksi. Jotta kvantisointivirheet eivät aiheuta liian suurta muutosta signaaliin, täytyy näytevälin olla riittävän pieni ja käytössä tulee olla riittävä määrä kvantisointitasoja [19].

Kvantisointi tapahtuu kvantisointivakioiden avulla. Kvantisointivakiot valitaan maksimi- ja minimiarvojen ja kvantisointitasojen määrän mukaan. Kvantisoitu arvo kertoo kuinka monennelle kvantisointitasolle arvo kuuluu. Kvantisointi tapahtuu yhtälöllä 5:

$$x_k = \frac{x - x_{min}}{k} \quad (5)$$

jossa

$x$  on muuttuja

$x_k$  on kvantisoitu muuttuja

$x_{min}$  on muuttujan minimiarvo

$k$  on kvantisointivakio, joka määräytyy yhtälöllä 5 mukaan

$$k = \frac{x_{max} - x_{min}}{n} \quad (6)$$

jossa

$x_{max}$  on muuttujan maksimiarvo

$n$  on kvantisointitasojen lukumäärä

Kvantisointitasojen lukumäärä kertoo kuinka monta eri arvoa muuttujalle sallitaan. Kvantisointivakio kertoo yhden kvantisointivälin pituuden ja samalla siis kvantisoinnin tarkkuuden.

Tutkimuksessa kvantisointitasoja on valittu esimerkiksi seuraavasti:

- Menoveden lämpötila: 50
- Edeltävä menoveden lämpötila: 8
- Ulkoilman lämpötila: 48
- Edeltävä ulkoilman lämpötila: 6
- Säteily: 2
- Edeltävä säteily: 2

Kvantisointitasojen lukumäärä tulee pitää riittävän pienenä, koska vaaditun taulukon koko kasvaa nopeasti. Vaaditun taulukon koko saadaan kertomalla kvantisointitasot keskenään. Esimerkiksi  $50 \cdot 8 \cdot 48 \cdot 6 = 115200$  kertoo kuinka suuren taulukon ulkolämpötila-kone tarvitsee toimiakseen. Säteilystä otetaan huomioon vain onko säteilyä tietyn rajan yli ollut. Rajaa voidaan säätää kvantisointivakiolla.

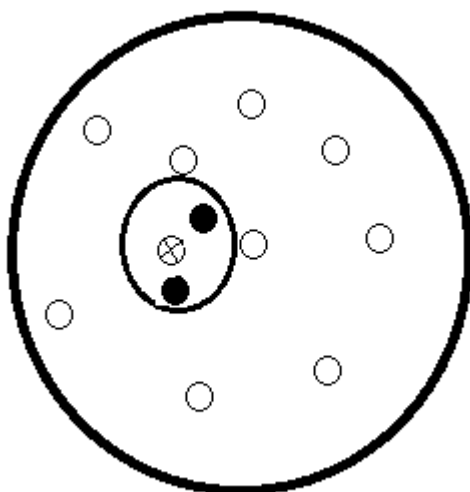
Kvantisointitasoja on varattu huomattavasti vähemmän muuttujien nykyhetkeä edeltäville arvoille. Edeltävien lämpötilojen mahdollisia arvoja on vähemmän, sillä lämpötila ei muutu ääriarvosta ääriarvoon, vaan hyppäykset ovat kohtuullisia. Mittausten mukaan kahden peräkkäisen aika-askeleen välillä muuttujien arvoissa tapahtuu ainoastaan yhden kvantisointitason suuruisia muutoksia. Näin ollen niille ei tarvitse varata yhtä suurta tilaa systeemissä. Mitä vähemmän kvantisointitasoja on, sitä pienemmäksi saadaan taulukko rajattua ja tarvittavien mittauspisteiden lukumäärä vähenee.

#### **5.2.1.2 Identifiointi**

Identifioinnin aikana menoveden lämpötilaa säädetään säätösuoran mukaisesti. Mittausjakson aikana malliin tallennetaan sisälämpötilan asetusarvon ja sisälämpötilan erotus sekä kvantisoituja arvoja nykyisistä ja edellisistä tulo- ja lähtösignaaleista (ulkolämpötila ja auringon säteily).

Taulukkoon jää mittausjakson jälkeen tyhjiä muistipaikkoja, jotka täytyy täyttää ennen mallin käyttöönottoa. Tyhjien muistipaikkojen täyttäminen tapahtuu lähimmän naapurin -menetelmällä (Nearest Neighbour). Kuva 8 kuvaa lähimmän naapurin -menetelmää.

Kuvassa 8 lähimmät pisteet ovat sisemmän ympyrän sisään jäävät mustat pisteet. Ruksilla oleva piste on tyhjä täytettävä piste. Lähimmät pisteet määräytyvät pisteiden ja täytettävän pisteen etäisyyden perusteella. Jos lähimmät pisteet ovat myös tyhjiä, ne sivuutetaan metodologia käytettäessä. Kaikki ympyrän sisään jäävät pisteet, jotka eivät ole nollia otetaan mukaan laskentaan. Pisteistä lasketaan keskiarvo ja täytetään paikka sillä [23].



**Kuva 8 Lähimmän naapurin-menetelmä (nearest neighbour-menetelmä)**



Lähimmän naapurin -metodi toimii mallissa hyvin. Ilman tätä metodologia mallissa olisi liikaa nollia ja toiminta olisi häiriintynyt. Ongelmia esiintyy tilanteissa, joissa lähimmät pisteet ovat nollia pitkältä etäisyydeltä tyhjän pisteen ympäriltä. Tällöin pisteen täyttävä arvo ei ole tarpeeksi lähellä oikeaa arvoa mallin toiminnan kannalta.

### 5.2.1.3 Tiedon tallennus

Tilakoneen dynaamisessa mallissa, jota demonstroidaan lattialämmityksessä, otetaan huomioon ulkolämpötilan nykyinen ja edellinen arvo, menoveden nykyinen ja edellinen arvo ja säteilyn osalta onko säteilyä ollut ja onko säteilyä nyt. Sisälämpötilatiedon avulla parannetaan ohjausta. Tiedot varastoidaan kvantisoiduna taulukkoon.

Tilakoneen jokaiselle tilalle, so. kvantisoiduille lähtö- ja tulosignaalien yhdistelmälle varataan oma muistiosoite, johon sisälämpötilan asetusarvon ja sisälämpötilan erotus tallennetaan. Näin ei tarvitse tallentaa jokaista muuttujan arvoa erikseen vaan osoite kertoo tarvittavan informaation yhdestä tilasta. Osoitteita tarvitaan yhtä monta kuin eri kombinaatioita on. Kombinaatioiden lukumäärä saadaan kertomalla jokaisen muuttujan kvantisointitasojen lukumäärä keskenään. Osoitteita tarvitaan siis ulkolämpötilataulukossa 115200 ja auringon säteilytaulukossa 1600. Kombinaation osoite saadaan kertomalla kombinaatiossa esiintyvien sisääntulotietojen kvantisoidut arvot kvantisointitasojen lukumäärillä yhtälön 7 mukaan [5].

$$M = (N_2 N_3 \dots N_p) \frac{v_1}{K_1} + (N_3 N_4 \dots N_p) \frac{v_2}{K_2} + \dots + N_p \frac{v_{p-1}}{K_{p-1}} + \frac{v_p}{K_p} \quad (7)$$

jossa

$N_2, N_3, \dots, N_p$  ovat kvantisointitasojen lukumäärät

$K_1, K_2, \dots, K_p$  ovat kvantisointivakiot

$v_1, v_2, \dots, v_p$  ovat muuttujien arvot

### 5.2.1.4 Predikointi

Tilakoneen muistiin tallennetaan identifiointivaiheessa säätösuoran ohjauksesta aiheutuvat sisälämpötilan poikkeamat asetusarvostaan. Tämän erotuksen, so. kustannusfunktion avulla menoveden lämpötilaa korjataan predikointivaiheessa. Korjauksen määrä riippuu erotuksen etumerkistä, ja itseisarvosta sekä kertoimesta (yhtälö 8). Kustannusfunktion kerroin valittiin kokeellisesti välillä 1-10.

Tilakonemallissa kokeiltiin erilaisia tapoja korjata menoveden lämpötilaa muuttamalla kustannusfunktiota. Mallissa, jossa säteilyä ei oteta huomioon, käytetään yksinkertaista korjaustapaa. Siinä menoveden lämpötilan korjaus on sisäilman ja asetusarvon erotus kerrottuna kertoimella (yhtälö 8).

$$T_{meno_1} = T_{meno_0} + (T_{sisä} - T_{ase}) * T_{kerr} \quad (8)$$

$T_{kerr}$  arvona tutkimuksessa käytettiin arvoja 1-10 välillä.

Mallissa, jossa säteily otetaan huomioon, korjaamisessa päädyttiin ratkaisuun, jossa erotus korotetaan toiseen potenssiin. Tämä suurentaa korjausta kun erotus on yli yhden ja pienentää korjausta kun erotus on alle yhden. Kun sisäilma on lähellä asetusarvoa, korjaus pysyy pienenä ja kun sisäilman ja asetusarvon erotus on suuri, myös korjaus on suuri. Varsinkin häiriötilanteessa, jossa häiriön vaikutus on suuri, korjauksen tulee olla riittävän aggressiivinen, mutta kun häiriö heilauttaa sisäilman lämpötilaa vain hieman korjaus pitää olla maltillinen.

Korjaus tapahtuu yhtälön 9 mukaisesti

$$T_{meno_1} = T_{meno_0} + (T_{sisä} - T_{ase})^2 \quad (9)$$

## 6 TRNSYS-simulointiohjelmisto

### 6.1 Esittely

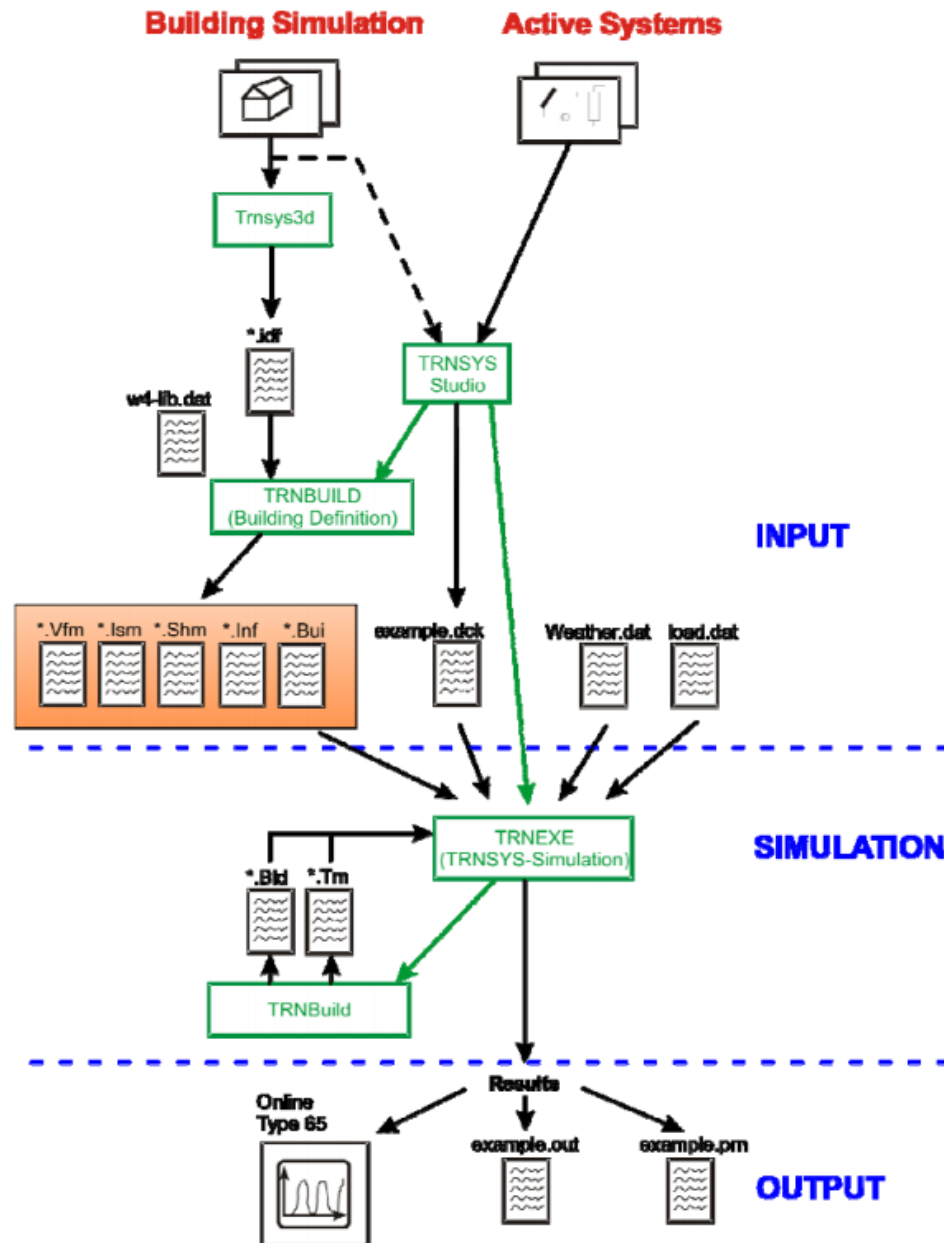
TRNSYS-simulointiohjelmisto on yleisesti käytössä oleva simulointiympäristö, jota käytetään rakennusten sähkö- ja lämpötekniikan järjestelmien dynaamiseen simulointiin. TRNSYS:ä voidaan käyttää myös muiden dynaamisten mallien kuten liikenteen ja biologisten prosessien simulointiin [6].

TRNSYS on Wisconsinin yliopistossa kehitetty graafinen ohjelmisto. Sen vahvuudet liittyvät avoimeen lähdekoodiin, jolloin käyttäjä pääsee tarkastelemaan ja tarvittaessa tekemään muutoksia ohjelman koodiin. Avoin lähdekoodi myös mahdollistaa omat lisäykset ohjelmistoon. Näin käyttäjä pääsee kehittämään ohjelmistoa halutuksi sekä tietää paremmin mitä ohjelmisto tekee ja miten ohjelmisto toimii.

TRNSYS on tehty kahdesta osasta. Ensimmäinen osa on moottori, jota kutsutaan Kerneliksi. Moottori lukee ja prosessoi tulotiedot, ratkaisee iteroiden systeemin, määrää yhteydet ja piirtää muuttujien arvot. Toinen osa on TRNSYS kirjasto, jossa sijaitsevat tarvittavat komponentit, joiden avulla erilaiset systeemit voidaan rakentaa [6].

TRNSYS jakautuu kolmeen eri osaan, joita ovat: Simulation studio, Trnbuild ja Trnedit. Simulation studio on graafinen käyttöliittymä, jossa systeemin simulointi ja tulosten tarkastelu pääosin tapahtuu. Trnbuild-ohjelmassa voidaan simuloitavaa rakennusta muokata ja määrittää rakennuksen toimintaa. Rakennus jakautuu eri vyöhykkeisiin, zoneihin, joiden ominaisuuksia voidaan erikseen muokata. Trnbuildissa voidaan rakentaa erilaisia seinä- ja lattiarakenteita ja aikatauluttaa erilaisia lämpökuormia ja sisäolosuhteita. Rakennuksen rakenteita muunnellaan seinämateriaaleja valitsemalla ja paksuuksia muuttamalla. Trnedit on editori, jonka avulla muokataan ja luodaan komponenttien tulotietoja.

Kuva 9 kuvaa ohjelmiston toimintaa. Tulotietoina tulevat rakennuksen tiedot, säätiedot ja komponentteihin asetetut arvot. Simulointivaiheessa TRNSYS:n moottori simuloi ja laskee lähtötiedot. Ulostulona saadaan kaikkien komponenttien lähtötiedot, jotka voidaan tulostaa graafisesti tai datatiedostona.



Kuva 9 TRNSYS:n toiminta [24]

TRNSYS:ssä systeemi rakennetaan valitsemalla komponentteja ja yhdistelemällä komponenttien lähtö- ja tulotietoja. Komponenteille annetaan ajasta riippumattomat parametrit ja säädetään halutut tulotiedot vakioiksi ja loput tulotiedot riippuvaisiksi muista komponenteista.

Ennen simuloinnin alkua täytyy simuloinnin aikaväli ja aika-askeleen pituus määrätä. Tutkimuksessa aika-askeleen pituutena on käytetty 15 minuuttia. Aikaväli on vaihdellut tilanteen mukaan. Ohjelmassa saadaan tulostettua kaikkien komponenttien lähtötiedot joko haluttuun tiedostoon tai graafisesti kuvaajaan.

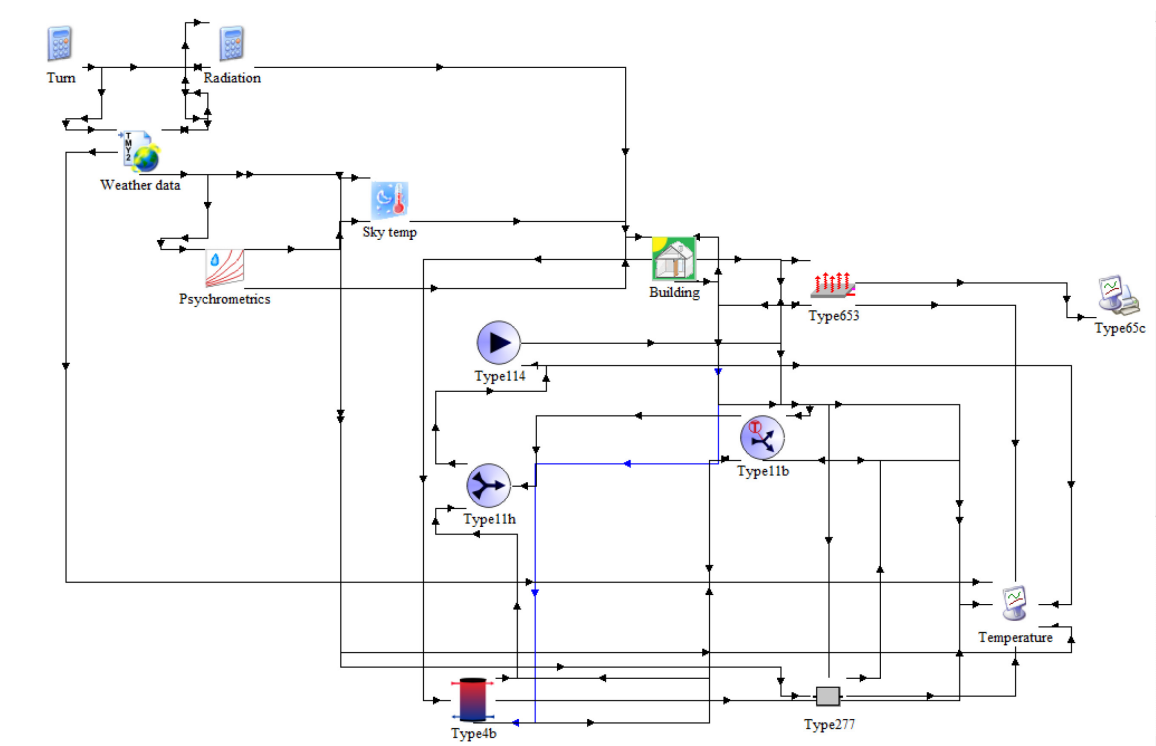
## 6.2 Laskentamenetelmä

TRNSYS ratkaisee komponenttien välisiä yhtälöitä kahdella eri menetelmällä, Powellin menetelmällä ja korvausmenetelmällä. Yleisimmin käytetään korvausmenetelmää, jossa seuraavien kierroksien lähtöarvot korvataan edellisiltä kierroksilta tuloksena tulleilla arvoilla. Powellin menetelmää käytetään, kun ulostuloarvot tunnetaan ja tarvitaan sisääntuloarvot. Tätä kutsutaan käänteislaskennaksi (engl. backsolving).

Differentialiyhtälöitä TRNSYS:ssä voidaan ratkaista kahdella eri tapaa, joko analyyttisesti tai numeerisesti. Numeerinen menetelmä perustuu laskenta-algoritmeihin ja vaatii enemmän laskentaa päästäkseen vastaavaan tarkkuuteen kuin analyyttinen menetelmä. Analyyttistä menetelmää kannattaa käyttää, jos yhtälö on helposti ratkaistavissa [25].

## 6.3 Järjestelmä

Kuva 10 on kuva Simulation studio työtilasta, jossa näkyy järjestelmä kokonaisuudessaan. Jokaisella komponentilla on oma kuvakkeensa ja komponenttien väliset yhteydet näkyvät nuoliviivoina.



**Kuva 10 Lämmitysjärjestelmä**

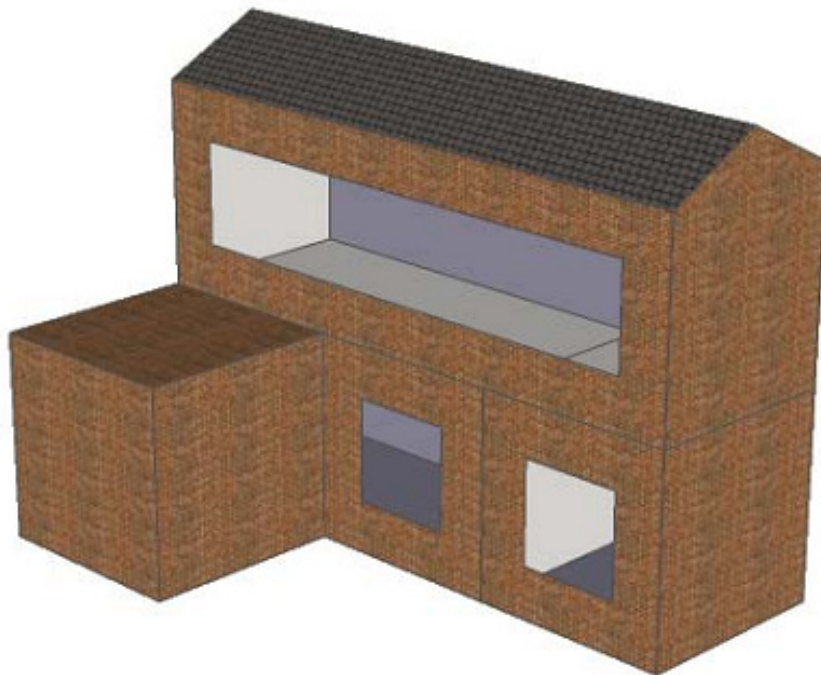
Järjestelmän keskellä on simuloitava rakennus. Sen yläpuolella ovat sääkomponentit. Oikeassa laidassa sijaitsevat tulostimet, joiden avulla saadaan simulointitulokset tallennettua.

Rakennuksen vieressä on lattialämmityskomponentti, jolla saadaan simuloitua lattialämmitys rakennukseen. Rakennuksen alapuolella olevat komponentit: tankki, termostaattiventtiili, 3-tie venttiili ja säädin muodostavat menoveden lämpötilan säätöjärjestelmän.

#### 6.4 Rakennus Type 56

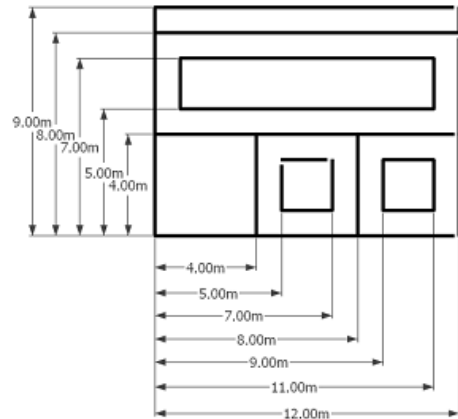
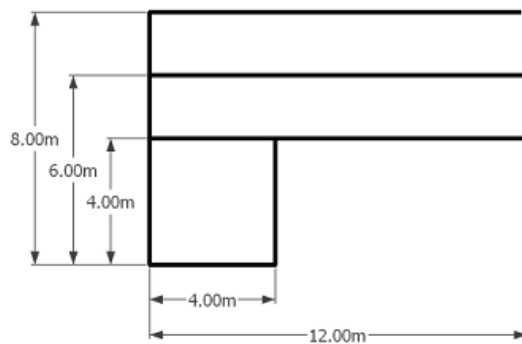
Järjestelmässä käytetty rakennus on TRNSYS:ssä valmiina oleva 3d-rakennus [2,3]. Rakennus on kaksikerroksinen asuin- ja toimistorakennus. Rakennus on jaettu kolmeen vyöhykkeeseen: ensimmäinen kerros (EG\_GB), toinen kerros (OG) ja ensimmäisen kerroksen kaakkoiskulmassa oleva toimisto (EG\_EB). Rakennuksen edessä on kuution muotoinen autotalli varjostamassa rakennusta. Rakennuksessa on harjakatto. (Kuva 11)

Tutkimuksessa käytetään kahta erilaista rakennusta: kevyt rakennus ja massiivinen rakennus. Geometria säilytetään rakennuksissa samanlaisena, ainoastaan seinä- ja lattiamateriaaleja ja niiden paksuuksia muutetaan.



**Kuva 11 Rakennus**

Rakennuksen julkisivu, jossa autotalli sijaitsee, on suoraan kohti etelää. Rakennuksessa on ikkunoita ainoastaan eteläpuoleisella seinällä, jotka näkyvät kuvassa 11. Rakennuksessa ei ole ovia. Rakennuksen kokonaispinta-ala on  $96 \text{ m}^2$  ja kokonaistilavuus  $408 \text{ m}^3$ . Rakennuksen tarkat mitat ovat kuvassa 12.



**Kuva 12 Rakennuksen mitat**

#### 6.4.1 Simuloitava tila

Simuloitavaksi tilaksi on valittu ensimmäisen kerroksen asuintila (EG\_GB). Tilan pinta-ala on 32 m<sup>2</sup> ja tilavuus 128 m<sup>3</sup>. Tilojen EG\_GB ja EG\_EB välissä on väliseinä, joka rajoittaa tilat erillisiksi. Tilassa on yksi ikkuna, joka sijaitsee etelä-seinällä. Ikkunan koko on 4 m<sup>2</sup>. Tilaa varjostaa autotalli, joka on etelä-seinällä länsireunassa. Autotallin koko on 4m\*4m. Autotalli on ensimmäisen kerroksen korkuinen.

Tilassa on lattialämmitys, joka on toteutettu erillisellä TRNSYS-komponentilla. Komponentti on liitetty rakennukseen asettamalla komponentin luovuttama energia tilan lattian sisääntulevaksi energiaksi. Tarkemmat detaljit lattialämmityksestä on esitelty osiossa Komponentit lattialämmitys. Lattialämmitys on mahdollista lisätä lattiarakenteisiin myös komponentti 56:n sisällä. Lattian rakenteeseen lisätään tällöin aktiivikerros, joka käyttäytyy samoin kuin erillinen komponentti [24].

Tilassa olevat tavarat ja huonekalut otettiin huomioon tilan sisäisen lämpökapasiteetin laskennassa. Rakennuksen sisäinen lämpökapasiteetti laskettiin yhtälöllä 10.

$$C_{p,tila} = 5\rho_i c_{p,i} V_{tila} \quad (10)$$

jossa

$\rho_i$  on ilman tiheys

$c_{p,i}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti

$V_{tila}$  on tilan tilavuus

Yhtälössä siis oletetaan, että huonekalujen ja muiden tavaroiden tuoma lisälämpökapasiteetti on viisinkertainen tilan ilman lämpökapasiteettiin.

Tilassa olevien ihmisten ja laitteiden aiheuttamat lämpökuormat voidaan ottaa huomioon simuloinnissa. Simulointi tehtiin ilman häiriötekijöitä ja häiriötekijöiden kanssa.

Häiriötilanteessa simulointiin lisättiin valaistus, kodinkoneet ja ihmiset. Myös ilmanvaihto otettiin huomioon simuloinnissa.

Ilmanvaihdon suositus asuinhuoneessa on  $0,5 \text{ l/sm}^2$  [11]. Simuloitavassa huoneessa se tekee  $57,6 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ilmanvaihto luvulla  $0,5 \text{ l/h}$ , ilmanvaihdon määrä simuloitavassa huoneessa on  $64 \text{ m}^3/\text{h}$ , joka ylittää hieman ilmanvaihdon suosituksen määrän. Huoneen ilmanvaihdoiksi valittiin  $0,5 \text{ l/h}$ . Ilmanvaihdon asuinrakennuksessa tulee olla jatkuvaa ja tarvittaessa tehostettavissa [11]. Perusilmanvaihto rakennuksissa pitää olla vähintään  $0,2 \text{ l/sm}^2$  [11]. Tehostetuksi ilmanvaihdoiksi valittiin kaksinkertainen määrä perusilmanvaihtoon nähden  $1,0 \text{ l/h}$ . Tuloilmana käytetään ulkoilmaa. Ilmanvaihdon aikataulutuksesta on tarkemmin osiossa Häiriöt.

Muiden tilojen lämpötilaksi on säädetty  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , jotta niiden vaikutus simulointiin olisi mahdollisimman todenmukainen.

#### **6.4.2 Sisäilma**

Sisäilman kosteus määräytyy ulkoilman mukaan. Rakennuksessa ei ole kosteuslähteitä.

#### **6.4.3 Kevyt rakennus**

Tarkoituksena on vertailla massiivista rakennusta pienen lämpökapasiteetin taloon. Kevyeksi rakennukseksi valittiin puurunkoinen talo, jossa eristeenä on lasivilla ja ulkovuorena on puulevy. Rakennuksen lämmöneristävyyssominaisuudet pyrittiin pitämään samana kuin massiivisessa rakennuksessa. Ainoastaan rakennusmateriaaleja ja paksuuksia vaihdettiin.

-Lattia on puurakenteinen, ja siinä on vesikiertoinen lattialämmitys. Lattian lämpökapasiteetti on  $1650 \text{ kJ/K}$ . Lattiassa on  $0,123 \text{ m}$  paksu eristys ja  $0,05 \text{ m}$  paksu puulattia. Lattian U-arvo on  $0,296 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

- Eristys
  - Tiheys  $100 \text{ kg/m}^3$
  - Ominaislämpökapasiteetti  $0,84 \text{ kJ}/(\text{kg}\text{K})$
- Puu
  - Tiheys  $650 \text{ kg/m}^3$
  - Ominaislämpökapasiteetti  $1,2 \text{ kJ}/(\text{kg}\text{K})$

-Ulkoseinät ovat puurunkoisia, joissa on puujulkisivu ja puuverhous sisäpuolella. Välissä  $0,14 \text{ m}$  paksuinen eriste. Seinän U-arvo on  $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

-Ikkunoiden U-arvoksi on valittu  $1,06 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  ja auringonsäteilyn kokonaisläpäisykertoimeksi eli g-arvoksi  $0,586$ .



-Tilat erottava väliseinä on kipsiväliseinä, jossa molemmilla puolilla on 13 mm paksut kipsilevyt ja välissä 0,1 m paksu runko. Seinän paksuus on 0,126 m ja U-arvo 0,358 W/(m<sup>2</sup>K).

-Välipohjana on käytetty puurunkoista rakennetta, jonka U-arvo on 0,896 W/(m<sup>2</sup>K).

#### **6.4.4 Massiivinen rakennus**

Massiivinen rakennus on rakennettu siten, että rakennuksella olisi mahdollisimman suuri lämpökapasiteetti, pitäen kuitenkin rakennusten U-arvot samoina.

-Lattiana on betonilaatta, jonka lämpökapasiteetti 15000 kJ/K. Betonilaatan paksuus on 0,2 m. Lattian U-arvo on 0,295 W/(m<sup>2</sup>\*K).

-Ulkoseinä massiivisessa rakennuksessa on sandwich-betoniseinä, jonka paksuus on 0,43 m. Kahden betonikerroksen välissä 0,18 m paksuinen eristys. Eristeenä on käytetty lasivillaa.

-Väliseinä on käytetty 0,2 m paksuista betoniseinää.

-Välipohja on kerrosten välissä oleva rakenne. Rakenteessa on 0,16 m paksu betonilaatta, ohut eristys ja lattiamatto. Rakenteen kokonaispaksuus on 0,26 m ja U-arvo 0,896 W/(m<sup>2</sup>K).

#### **6.4.5 Tulotiedot**

Rakennukselle tulotietoina tulevat säätiedot (ulkolämpötila, auringon säteily, maan lämpötila, taivaan lämpötila jne.) ja lattialämmityskomponentilta lämmitysenergia.

#### **6.4.6 Lähtötiedot**

Lähtötietoina rakennukselta saadaan paljon erilaisia tietoja. Tutkimuksessa tärkein on sisäilman lämpötila.

### **6.5 Säätiedosto**

TRNSYS sisältää maailmanlaajuiset säätiedot. TRNSYS käyttää tietolähteenä Meteotestin Meteororm-katalogia, johon on koottu ilmatieteellistä tietoa ympäri maailmaa [26]. Sää- ja säteilytiedot perustuvat tyypillisiin meteorologisiin kuukausittaisiin arvoihin. Säätietojen formaattina on TMY2 [27].

Säätiedostojen lukuun käytetään TRNSYSin komponenttia TYPE 109, joka lukee säätiedot tiedostosta säännöllisin aikavälein, muuntaa ne sopiviksi ja prosessoi tiedot oikeaan muotoon. Typen parametreilla voidaan vaikuttaa diffuusin säteilymallin valintaan ja ohjailla pintojen kääntymistä auringon suhteen [28].

Taivaan lämpötilan laskemiseen käytetään TYPE 69:sta. Tämä komponentti määrittää tehollisen taivaan lämpötilan ilmakehän ja pintojen välisen säteilyn laskemiseen. Pilvet ovat tärkeä osa laskettaessa tehollista taivaan lämpötilaa. Komponentti määrittää pilvisyyden kuivalämpötilan ja kastepisteen perusteella [28].

Sääkomponenteista TYPE 33e laskee kostean ilman ominaisuuksia. Tulotietona komponentilla on kuivalämpötila ja suhteellinen kosteus. Lähtötietona komponentti palauttaa kastepisteen, lämpötilan, suhteellisen kosteuden, absoluuttisen kosteuden ja ilman entalpian [28].

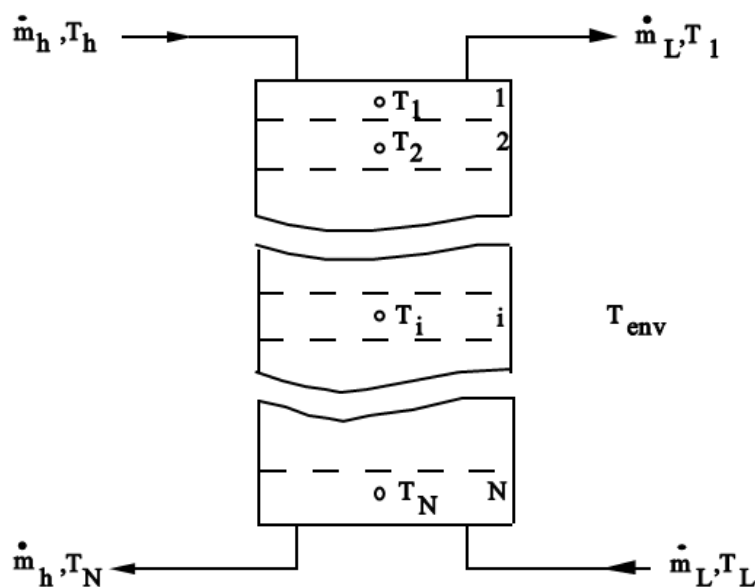
Työssä käytetään Helsinki-Vantaa lentokentältä kerättyä säätietoa. Tarkat paikkatiedot ovat 60,32° pohjoista leveyttä ja 24,97° itäistä pituutta ja 53 metriä merenpinnan yläpuolella.

Pienempien säteilyn arvojen takia säteily-osuudessa käytettiin myös Sodankylän säätiedostoa. Sodankylä sijaitsee Pohjois-Suomessa. Koordinaatit ovat 67,42° pohjoista leveyttä ja 26,59° itäistä pituutta.

## 6.6 Komponentit

### 6.6.1 Varaaja TYPE 4b

TYPE 4b on kerroksellinen terminen energiavarasto, jossa on kaksi sähkövastusta lämmönlähteenä. Varaaja on nestetäytteinen, ja varastoi energiaa nesteen lämpökapasiteetin avulla. Tankin kerroksien lukumäärä voidaan valita. Jokaisen aika-askeleen jälkeen lämpötilaerot vierekkäisten kerrosten välillä tasoittuvat [28]. Kuva 13 esittää tankin massavirtoja.



Kuva 13 Tankki [29]

TYPE 4b:ssä on useita parametreja, joita muuttamalla saadaan varaaja toimimaan halutulla tavalla. Tutkimuksessa käytetyn tankin kooksi on määritetty  $2 \text{ m}^3$ . Tankissa on viisi kerrosta, joiden korkeus on  $0,2 \text{ m}$ . Nesteenä käytetään vettä (tiheys  $1000 \text{ kg/m}^3$ , ominaislämpökapasiteetti  $4.19 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$  ja kiehumispiste  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Varaajassa on sisäänrakennettu termostaatti, joka pitää veden lämpötilan  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . Varusteisiin kuuluu myös kaksi  $10 \text{ kW}$  sähkövastusta. Sähkövastusten tehot on valittu niin, että niiden maksimiteho riittää menoveden lämpötilan nostamiseen haluttuun arvoon kaikissa tilanteissa. Vastus numero 1 sijaitsee kerroksessa 2 ja vastus numero 2 kerroksessa 3. Vastusten termostaatit sijaitsevat vastusten kanssa samassa kerroksessa. Vastukset toimivat Master/Slave-periaatteella. Alempi vastus menee päälle ainoastaan silloin kun ylemmän lämmitysteho ei riitä. Vastukset käynnistyvät, kun veden lämpötila laskee alle  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , ja menevät pois päältä, kun lämpötila nousee yli  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . Niitä säädellään Setpoint- ja Deadband -parametreilla. Varaajan lämpövuodot voidaan myös määrittää parametrien avulla. Lämpövuodon oletusarvoksi on valittu  $3,9 \text{ kJ/(hr}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K)}$ .

Tankista ulosvirtaava vesi lähtee varaajan yläosassa olevasta liittimestä. Vesi ohjataan venttiiliin TYPE 11h, jossa se yhdistyy jo kiertäneeseen lämmitysveteen. Tankiin tuleva ja tankista lähtevä massavirta ovat yhtäsuuria. Tankilta lähtee myös tieto veden lämpötilasta termostaattiventtiilille 11b, jonka perusteella venttiili säätää menoveden lämpötilan haluttuun arvoon. Tankin lähtötietona saadaan myös sähkövastusten energiakulutus.

#### **6.6.2 Pumppu TYPE 114**

TYPE 114 on yksinopeuksinen pumppu, jota ohjataan kontrollisignaalin avulla päälle ( $>0.5$ ) tai pois päältä ( $<0.5$ ). Kun pumppu on pois päältä, massavirta, pumpun tarvitsema energia ja nesteeseen siirtyvä energia ovat nolli. Jos pumppu on päällä, pumpun arvot asettuvat säädettyihin arvoihin. Pumpun tehtävänä on luoda paine-ero, joka pyörittää nestettä järjestelmässä suunnitellusti. Pumpun aikaansaama massavirta pidetään vakiona koko mittausjakson ajan.

Pumpun tulotietoina ovat sisään tulevan nesteen massavirta ja lämpötila, kontrollisignaali sekä pumpun ja moottorin teho. Tulevan nesteen massavirta- ja lämpötilatieto tulevat venttiiliin 11h lähtötietona. Kontrollisignaaliarvoksi on valittu 1, koska pumppu halutaan pitää päällä koko ajan. Pumpun ja moottorin tehokkuudeksi on valittu asetusarvot 0,6 ja 0,9.

Lähtötietoina saadaan lähtevän nesteen lämpötila ja massavirta. Pumpun muita lähtötietoja ovat energiankulutus sekä nesteeseen ja ympäristöön siirtyvä lämpöenergia.

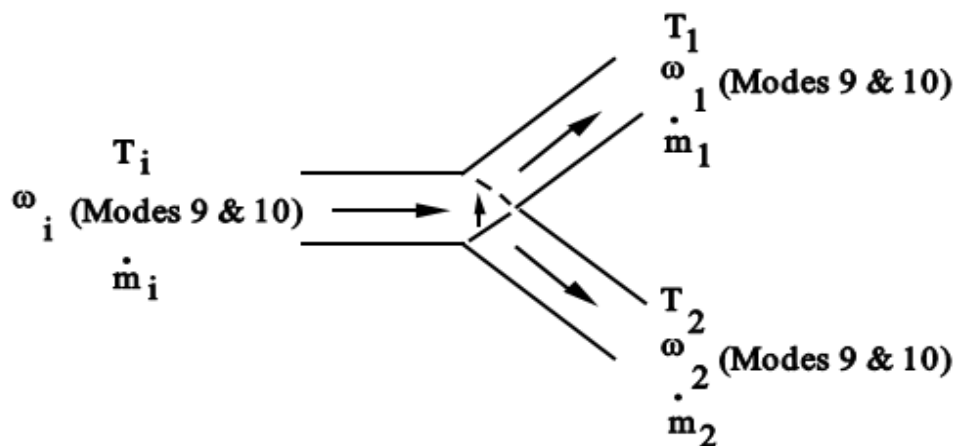
Pumpun asetuksista voidaan valita sijaitseeko moottori pumpun rakenteen sisä- vai ulkopuolella. Jos valitsee parametriin motorloss fraction arvon 0, moottori sijaitsee ulkopuolella ja pumppu ei lämmitä virtaavaa nestettä. Jos valitsee arvon 1, pumppu sijaitsee sisäpuolella ja pumppu lämmittää nestettä. Tutkimuksessa pumppu sijaitsee järjestelmän ulkopuolella.

Muita parametreja pumpussa ovat haluttu massavirta, nesteen ominaislämpökapasiteetti ja pumpun teho. Massavirraksi on valittu 200 kg/h ja pumpun tehoksi 15 W. Nesteen ominaislämpökapasiteetiksi valittiin veden ominaislämpökapasiteetti.

Kun pumppu käynnistyy, massavirta hyppää suoraan pumpulle säädettyyn nopeuteen. Siitä ei kuitenkaan ole haittaa, koska simulointiaskel on yleensä pidempi kuin pumpussa oikeasti tapahtuva viive. Pumppu ei myöskään osaa tarkistaa onko sillä riittävästi massaa saatavilla, jotta säädetty massavirta pystytään toteuttamaan. Yhden pumpun systeemissä ei tästä aiheudu ongelmia [29].

### 6.6.3 Termostaattiventtiili TYPE 11b (mode4)

Termostaattiventtiili on säädin, joka sekoittaa menoveden lämpötilan haluttuun arvoon. Venttiilin tulotietoina ovat lattialämmityspiiristä tulevan veden lämpötila ja massavirta sekä tankista ulostulevan veden lämpötila. Venttiili siis jakaa osan lämmitysjärjestelmässä kiertävästä vedestä takaisin kiertoön ja osan vedestä menemään varaajaan kautta. Kuvassa 14 on venttiilin toimintaa on kuvattu graafisesti. Kun sisään tulevan nesteen lämpötila on pienempi kuin venttiilin säädetty lämpötila, venttiili ohjaa veden varaajaan. Jos sisään tulevan veden lämpötila on suurempi kuin säädetty lämpötila, venttiili ohjaa veden takaisin kiertoön. Venttiili saa lämpötilan asetusarvon toisessa järjestelmässä laskimelta ja toisessa järjestelmässä tutkimusta varten tehdyltä TYPE-ohjelmalta.



Kuva 14 Termostaattiventtiili [29]

Kuvassa 14:

$T_i$ =Sisääntulonesteiden lämpötila

$T_1$ =Ulosmenonesteiden 1 lämpötila

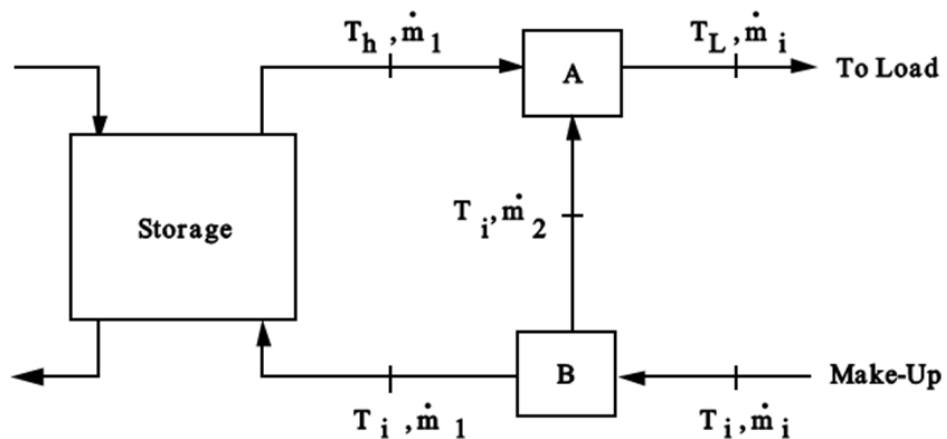
$T_2$ =Ulosmenonesteiden 2 lämpötila

$m_0$ =Sisääntulonesteiden massavirta

$m_1$ =Ulosmenonesteiden 1 massavirta

$m_2$ =Ulosmenonesteiden 2 massavirta

Usein käytännönjärjestelmissä termostaattiventtiili sijoitetaan varaajan jälkeen tulevaan haaraan A. Mutta tässä kyseisessä järjestelmässä termostaattiventtiili on asetettu ennen varaajaa olevaan haaraan B, koska näin simulointiohjelmisto kykenee paremmin säätämään menoveden lämpötilaa (kuva 15) [29].



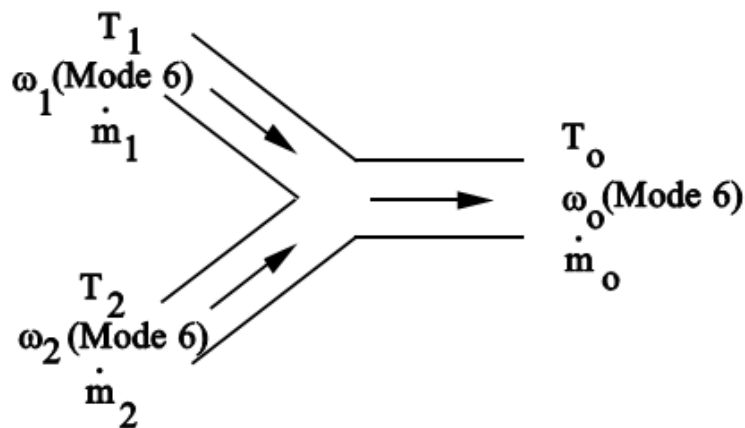
**Kuva 15 säätöjärjestelmä [29]**

Lähtötietona venttiilistä saadaan haaran yksi lämpötila ja massavirta, joka menee varaajaan ja haaran kaksi lämpötila ja massavirta, joka menee suoraan venttiilille 11h, josta vesi etenee lattialämmityspiiriin.

#### **6.6.4 Venttiili TYPE 11h (mode1)**

TYPE 11h on venttiili, joka yhdistää kaksi eri putkea. Tulotietona venttiilissä on yhdistyvissä putkissa virtaavien nesteiden lämpötilat ja massavirrat. Lähtötietona saadaan virtaamien summa ja yhdistyneen nesteen lämpötila [28].

Tankista tuleva vesi menee haaraan yksi ja lämmitysjärjestelmässä kiertänyt vesi haaraan kaksi. Ulostulohaarasta lähtevä vesi menee lattialämmitysjärjestelmään. Kuvassa 16 on esitetty TYPEn 11h toiminnan kuvaus. Yhdistyvän nesteen lämpötila ja massavirta lasketaan yhtälöiden 11 ja 12 avulla [28].



Kuva 16 Venttiili [29]

$$T_0 = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2} \quad (11)$$

$$m_0 = m_1 + m_2 \quad (12)$$

joissa

$T_0$  = Ulostulonesteiden lämpötila

$T_1$  = Sisääntulonesteiden 1 lämpötila

$T_2$  = Sisääntulonesteiden 2 lämpötila

$m_0$  = Ulostulonesteiden massavirta

$m_1$  = Sisääntulonesteiden 1 massavirta

$m_2$  = Sisääntulonesteiden 2 massavirta

### 6.6.5 Laskin

TRNSYS:ssä on laskin, jonka avulla voidaan ohjata komponentteja yhtälöiden avulla. Perinteiseen lattialämmitysjärjestelmään tarvitaan säädin, joka ohjaa termostaattiventtiiliä ulkolämpötilan mukaan. Tämä on toteutettu laskimella. Laskimeen tulee tulotietona ulkolämpötila. Lähtötietona laskimessa on termostaattiventtiilin asetusarvolämpötila. Laskin laskee lämpötilan annetun suoran ominaisuuksien mukaan.

### 6.6.6 Lattialämmitys TYPE 653

TYPEn 653 avulla voidaan rakennukseen asentaa yksinkertainen lattialämmitysjärjestelmä. Type olettaa, että laatta on isoterminen kappale ja että energian siirtyminen kiertävästä nesteestä laattaan voidaan mallintaa samoin kuin lämmittimellä. Tämä tarkoittaa sitä, että lattia toimii analogisesti samalla tavalla kuin yhden resistanssin ja kapasitanssin muodostama RC-piiri. Lattian käyttäytyminen poikkeaa todellisen lattian lämpenemisestä ja viilenemisestä. Oikeanlaisen laatan analogisessa mallissa olisi ääretön määrä RC-piirejä. Näiden oletuksien ja

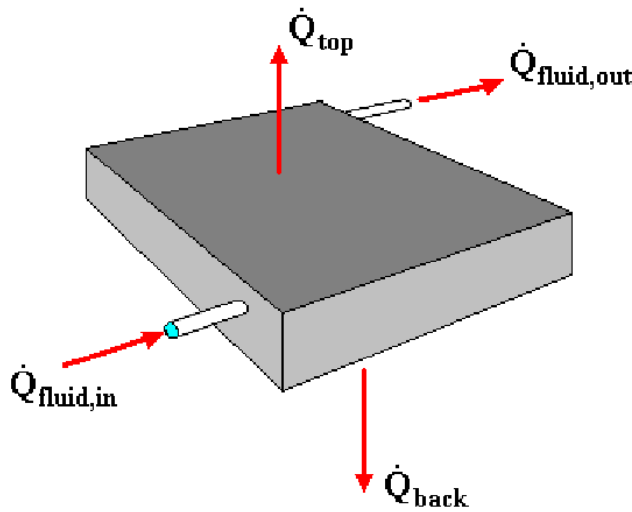
yksinkertaistusten jälkeen laatta voidaan mallintaa yhtälön 13 mukaisella yksinkertaisella differentiaaliyhtälöllä.

$$\frac{dT}{dt} = aT + b \quad (13)$$

jossa

a ja b ovat vakioita.

Laatan isotermissysoletus on perusteltua, jos laatan lämpökapasiteetti on suuri verrattuna lämmön siirtymiseen laatan pinnalta [29]. Kuva 17 esittää laatan lämpövirrat ja niiden suunnat.



**Kuva 17 Lattialämmitys**

Laatan energiabalanssia kuvaa yhtälö 14.

$$m_{slab} c_{p_{slab}} \frac{dT_{slab}}{dt} = -UA_{top}(T_{slab} - T_{top}) - UA_{back}(T_{slab} - T_{back}) + \varepsilon C_{min}(T_{fluid\ in} - T_{slab}), \quad (14)$$

jossa

$m_{slab}$  = Laatan massa

$c_{p_{slab}}$  = Laatan lämpökapasiteetti

$T_{slab}$  = Laatan lämpötila

$UA_{top}$  = Lämmönsiirtokerroin laatan yläpinnan ja ilman välillä

$T_{top}$  = Yläpuolisen alueen lämpötila

$UA_{back}$  = Lämmönsiirtokerroin laatan alapinnan ja ilman välillä

$T_{back}$  = Alapuolisen alueen lämpötila

$\varepsilon$  = Lämmönsiirtimen tehokkuus laatan ja nesteen välillä

$C_{min}$  = Laatan ja nesteen minimi lämpökapasiteetti

$T_{fluid\ in}$  = Nesteen sisäänmenolämpötila

[30]

TYPEn 653 parametreina annetaan laatan lämpökapasiteetti, nesteen ominaislämpökapasiteetti ja laatan alkulämpötila. Nesteen ominaislämpökapasiteetiksi on asetettu veden ominaislämpökapasiteetti  $4,19 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ . Laatan alkulämpötilaksi on säädetty  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Laatan lämpökapasiteetin arvoa vaihdellaan rakennuksen ominaisuuksien mukaan.

Tulotietoina komponentti tarvitsee sisään menevän nesteen lämpötilan ja nesteen massavirran, jotka saadaan pumpun lähtötietoina. Tilan lämpötila saadaan rakennuksen sisäilman lämpötilasta. Ympäristön lämpötilaksi on asetettu arvio maaperän lämpötilasta. Tutkimuksessa käytettiin vakioarvoa  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lämmön menetykset ympäristöön arvioidaan yhtenä tulotietona. Arvoksi on valittu asetusarvo  $500 \text{ kJ}/(\text{hr}\cdot\text{K})$ . Lattialämmitysjärjestelmän määrittämiseen tarvitaan vielä lämmönsiirtokerroin laatan ja ilman välillä lämpötilaeron suhteen, eli millä teholla laatta luovuttaa energiaa yhden asteen lämpötilaerolla. Siinä asetusarvo on  $2000 \text{ kJ}/(\text{hr}\cdot\text{K})$ . Jos  $2000 \text{ kJ}/(\text{hr}\cdot\text{K})$  jaetaan huoneen neliöllä ja muutetaan Wateiksi, saadaan kokonaislämmönsiirtymiskertoimeksi  $15,43 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , joka on kohtuullisen suuri. Uponor käyttää kertoimelle arvoa  $11,6 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  [7]. Laatan ja nesteen lämmönsiirtotehokkuudeksi on valittu 0,6.

Juuri tehdyn tutkimuksen *On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room* mukaan kokonaislämmönsiirtymiskertoimen tulisi käyttää vielä pienempää arvoa. Tutkimuksen mukaan kertoimen tulisi olla  $7,6\text{--}9,6 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  [10]. Pienemmällä kertoimella laatan lämmönluovutus sisäilmaan laskisi. Tällöin menoveden lämpötilat nousisivat hieman. Tämä saattaisi parantaa järjestelmän säädettävyyttä.

Laatta liitetään rakennukseen laittamalla lattialämmityskomponentista lähtötietona saatava tilaan siirtyvä lämpöenergia (zone heat transfer) rakennuksen lattian lämpöenergian saanniksi (wall gain). Muita komponentista saatavia lähtötietoja ovat laatan lämpötila ja paluuveden lämpötila ja massavirta. Paluuveden lämpötilaa ja massavirtaa käytetään tulotietoina termostaattiventtiilille, josta kierros alkaa uudestaan.

#### **6.6.7 Lattialämmityksen ohjaus TYPE 277**

Diplomityössä suunniteltiin lattialämmityksen ohjaukseen oma TYPE-komponentti, joka lukee tulotietoina ulkoilman lämpötilan, sisäilman lämpötilan, auringon säteilyn ja ilmanvaihdon määrän (ks. Liite A). Lähtötietona komponentti antaa menoveden lämpötilan termostaattiventtiilille. Komponentti luo systeemin dynaamisen mallin mittaamalla ja kvantisoimalla prosessin tulo- ja lähtötiedot, ja tallentamalla tiedot taulukkoon. TYPE 277 prediktoi taulukon ja ulkolämpötilatietojen avulla lattialämmitysjärjestelmän menovedelle



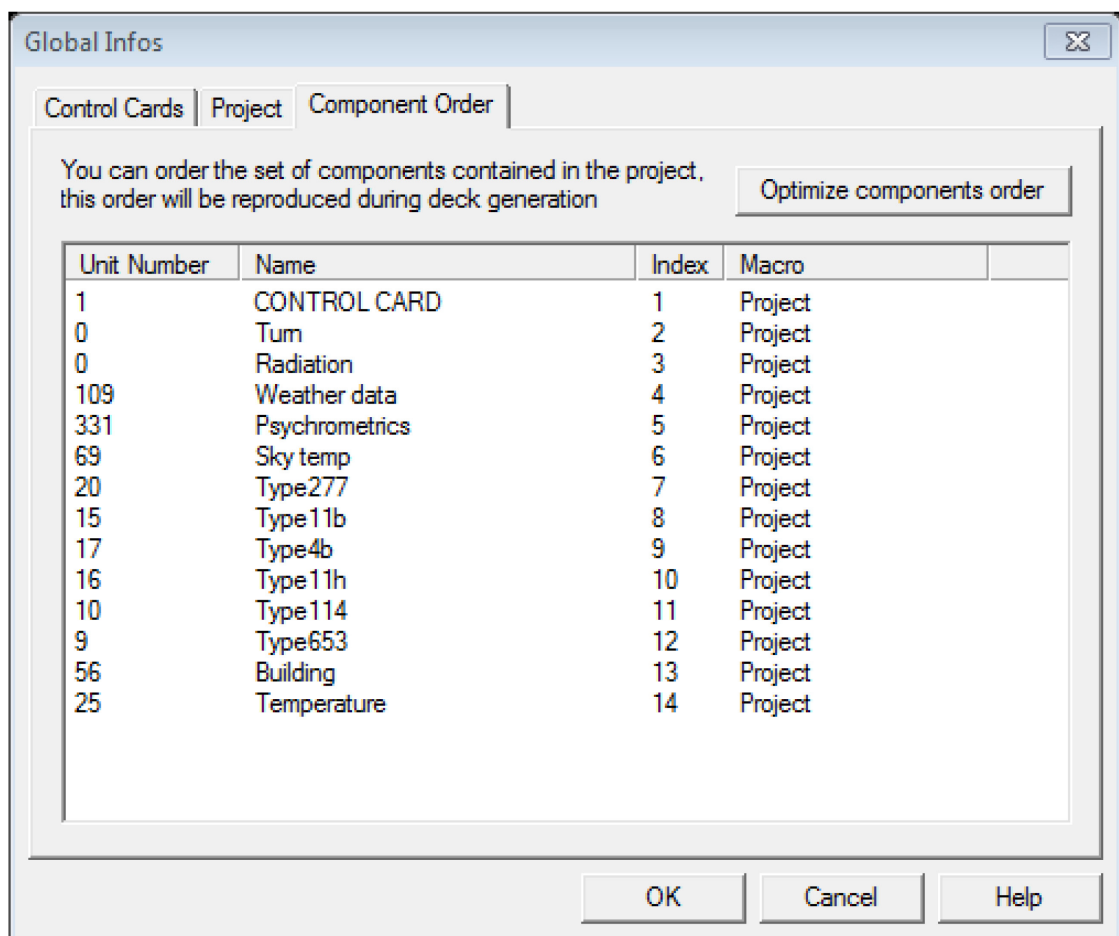
sopivan lämpötilan 15 minuutin aikavälein. Komponentin tulotiedoksi voidaan liittää myös sääennustetiedot, jonka avulla ennakointi on helppo toteuttaa.

### 6.6.8 Tulostin TYPE 65

Tulostimia TRNSYS:ssä on useita erilaisia. TYPE 65d on tulostin, joka tulostaa tiedot graafisesti TRNSYS:ssä olevalle lisälehdelle. Tulostimelle annetaan tulotietona haluttujen komponenttien lähtötiedot ja määritetään akseleiden skaalat. Tulostin piirtää käyrät koordinaatistoon, josta ne ovat helposti luettavissa. TYPE 65c on tulostin, jolla saadaan tulostettua komponenttien lähtötietojen arvoja jokaiselta aika-askeleelta tiedostoon. Tiedoston tiedot voidaan siirtää haluttuun ohjelmaan ja muokata.

### 6.6.9 Komponenttien suoritusjärjestys

TRNSYS:ssä komponenttien suoritusjärjestys voidaan valita. Komponenttien suoritusjärjestyksessä täytyy käyttää harkintaa, varsinkin jos järjestelmässä on ohjauslaitteita, jotka käyttävät muiden komponenttien lähtötietoja toiminnassaan. Suoritusjärjestys on valittu kuvan 18 mukaiseksi, jotta järjestelmä toimisi oikein.



Kuva 18 Suoritusjärjestys

TRNSYS suorittaa ensimmäiseksi sääkomponentit ja niihin liittyvät säätiedostot. Seuraavaksi suoritetaan säätökomponentti, joka syöttää termostaattiventtiilille halutun menoveden lämpötilan. Sitten ohjelma käy läpi varaajan, venttiilin ja pumpun toiminnot. Kun lattialämmitysjärjestelmään sisääntuleva vesi on saatu ohjattua halutuksi, suoritetaan lattialämmityskomponentti, joka antaa rakennukselle lämpöenergian, jolla rakennus lämpenee. Rakennuksen simulointi on toiseksi viimeisenä ennen tulostinkomponenttia. Rakennus antaa lähtötietona ohjauskomponentille sisäilman lämpötilan, jonka avulla komponentti korjaa ohjausjärjestelmäänsä seuraavalla aika-askeleella.

## **6.7 Perinteisen säädön toteutus**

TRNSYS:ssa perinteinen menoveden lämpötilan säätö, so. ulkolämpötilakompensointi on toteutettu termostaattiventtiilin ja laskimen avulla. Laskimeen syötetään suoran yhtälön parametrit, jolloin se laskee menoveden lämpötilan ulkolämpötilan funktiona. Laskimeen voidaan myös asettaa minimi- ja maksimiarvo menovedelle, jotta menoveden lämpötila ei laske liian alas eikä nouse liian korkeaksi. Järjestelmän ylärajana toimii 50 °C ja alarajana 23 °C. Laskimelta saatu menovedenlämpötila annetaan termostaattiventtiilille tulotietona, joka säätää menoveden lämpötilan suoran mukaiseksi. Lisäksi tarvitaan yksi 3-tie venttiili, joka kokoaa suoraan takaisin kiertoön menevän veden ja tankilta tulevan veden yhteen putkeen ja pumpun, joka pitää massavirran tasaisena.

Tutkimuksessa säädetään lämmitystä ainoastaan muuttamalla menoveden lämpötilaa. Lämmitysvesi kiertää lattialämmitysjärjestelmässä koko ajan samalla massavirralla. Tämän takia toteutukseen ei tarvita muita komponentteja.

### **6.7.1 Säättösuoran valinta**

Säättösuoran yhtälön parametrit ovat rakennuskohtaisia. Tutkimuksessa säättösuora on valittu kokeilemalla siten, että simulointijakson aikana, häiriöttömissä olosuhteissa sisälämpötila pysyy mahdollisimman tasaisesti 20 °C.

Todellisessa tilanteessa säättösuora ei ole aina kohdallaan, koska suoran virittäminen oikeaan asentoon on haastavaa. Tutkimuksessa on käytetty useita eri säättösuoria, johtuen tilanteen muutoksista ja halutusta vaikutuksesta. Käytetty suora on mainittu aina erikseen.

## **6.8 Tilakonesäädön toteutus**

Tilakoneeseen perustuvan lämpödynaamisen mallin avulla tapahtuva menoveden lämpötilan säätö on toteutettu tekemällä säätötoimintoja varten oma komponentti TYPE 277. TYPE 277

ohjaa termostaattiventtiiliä lämpödynaamisen mallin mukaisesti. Lämmitysjärjestelmä on pidetty samanlaisena kuin perinteisessä säätätavassa. Järjestelmä on kuvattu tarkemmin osiossa Järjestelmä.

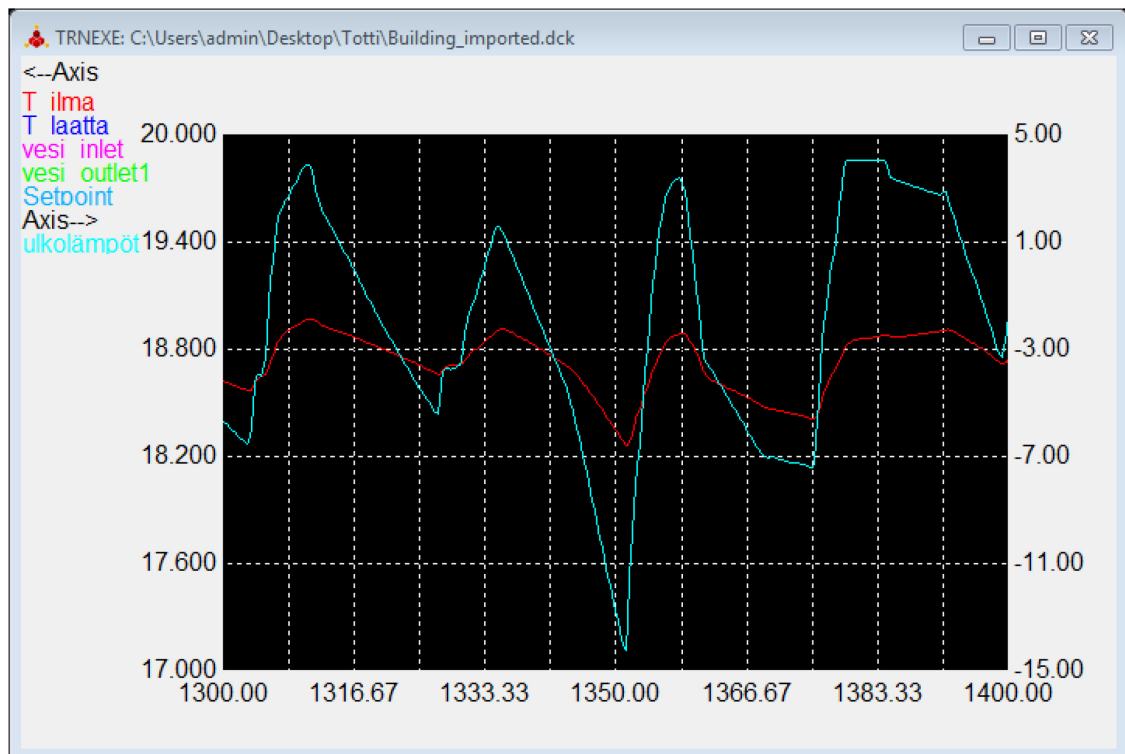
TYPE 277 on kirjoitettu Fortran 95 kielellä. Komponentin runko on luotu TRNSYS:ssä määrittelemällä komponentin parametrit sekä tulo- ja lähtötietomuuttujat. TRNSYS luo automaattisesti komponentin rungon, joka sisältää TRNSYS:n vaatimat määrittelyt, tulo-, lähtötietojen ja parametrien siirrot ohjelmaan ja ohjelmasta ulos sekä kutsut aliohjelmiin. Rungon sisälle merkittyyn paikkaan kirjoitetaan oma ohjelmakoodi. Ohjelmakoodi mahdollistaa oman ohjelmakoodin nopean käyttöönoton TRNSYS:ssä. Jokainen TRNSYS:ssä oleva komponentti tarvitsee toimiakseen kaksi tiedostoa: proforma ja DLL-tiedoston. Proforma pitää sisällään komponentin perustiedot. Tiedot komponentin tulo- ja lähtötiedoista ja parametreista, komponentin numeron, kuvakkeen jota komponentti käyttää graafisessa käyttöliittymässä jne. DLL-tiedosto sisältää varsinaisen käännetyt ja linkityt ohjelmakoodin, jonka komponentti simuloimassa suorittaa. DLL-tiedosto luodaan Microsoft Visual Studio avulla.

## 7 Kevyen ja massiivisen rakennuksen lämpödynaamisia ominaisuuksia

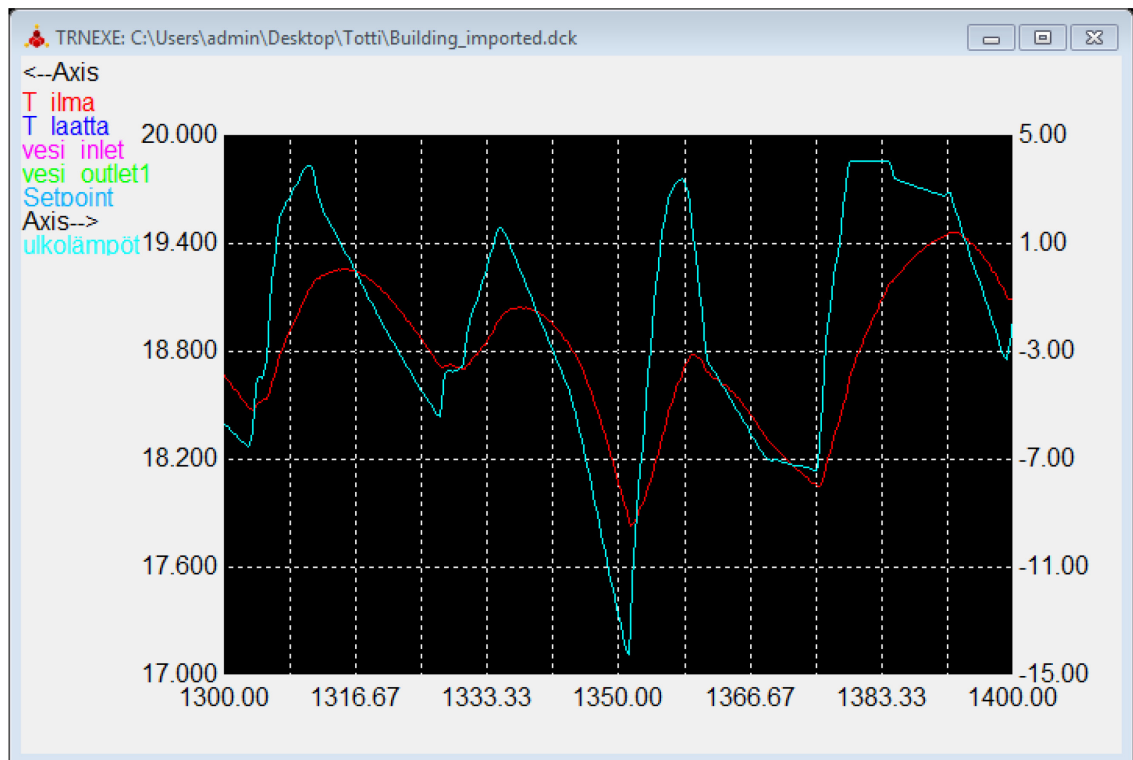
Massiivisen rakennuksen suurempi lämpökapasiteetti aiheuttaa lämmöntarpeeseen viivettä ulkolämpötilan muuttuessa, mutta myös lämmitysteho muuttuu viiveellä laatan suuren lämpökapasiteetin vuoksi. Kevyen rakennuksen lämmityksen säätäminen on yksinkertaisempaa lyhyempien viiveiden takia.

Kevyttä laattaa pidetään monissa kaupallisissa lattialämmitysratkaisuissa parempana vaihtoehtona sen nopeuden ansiosta [31]. Kevyt laatta reagoi nopeammin muutoksiin ja tätä pidetään energian ja viihtyisyyden kannalta tärkeänä. Usein unohdetaan massiivisen laatan hyvät puolet. Se tasaa lämpötilaeroja ja vähentää lämmityspiikkejä. Massiivisen laatan hitaudesta on hyötyä, jos rakennuskin käyttäytyy hitaasti (Kuvat 19 ja 20).

Lattian lämmitysteho riippuu laatan ja sisäilman välisestä lämpötilaerosta yhtälön 2 mukaisesti. Vaikka laattaan menevän lämmitysveden lämpötila pysyy samana, lämmitysteho voi hetkittäin olla erilainen johtuen sisälämpötilan suuruudesta. Tämä on lattialämmityksen parhaita puolia. Se säätyy itsestään.



Kuva 19 Massiivinen rakennus, vakio menoveden lämpötila



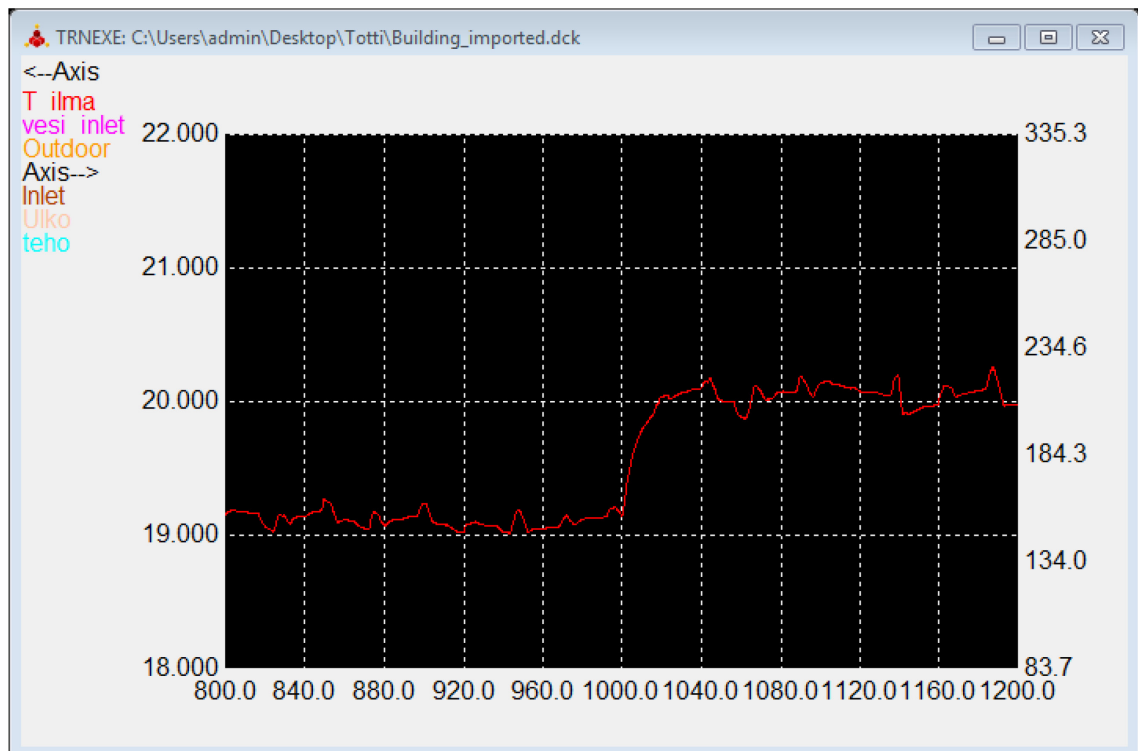
Kuva 20 Kevyt rakennus, vakio menoveden lämpötila

## 8 Ulkolämpötila säädön häiriötekijänä

### 8.1 Tilakonesäädön ominaisuuksia

Jos säätökäyrä on viritetty oikein rakennuksen lämpödynaamisten ominaisuuksien mukaisesti, perinteinen säätökäyrän ohjaukseen perustuva ulkolämpötilakompensointi toimii kohtuullisen hyvin lattialämmityksen ohjauksessa, varsinkin käytettäessä erillistä termostaattia huonelämpötilan säädössä. Sisäilman lämpötilan vaihtelut ovat pieniä. Usein tilanne on kuitenkin se, että säätökäyrä ei ole kohdallaan, koska oikean käyrän löytäminen on haasteellista. Tilakonesäätö toimii siten, että mallin identifiointivaiheessa se ohjaa menoveden lämpötilaa säätökäyrän avulla, mutta korjaa mallin tietoja sisälämpötilamittausten avulla. Kullakin näytteenottohetkellä ohjelma tallentaa sisälämpötilan poikkeaman asetusarvostaan. Identifiointivaiheen jälkeen tilakone säätää menoveden lämpötilaa edelleen säätösuoran mukaan, mutta korjaa sen arvoa tallennetun poikkeaman mukaisesti.

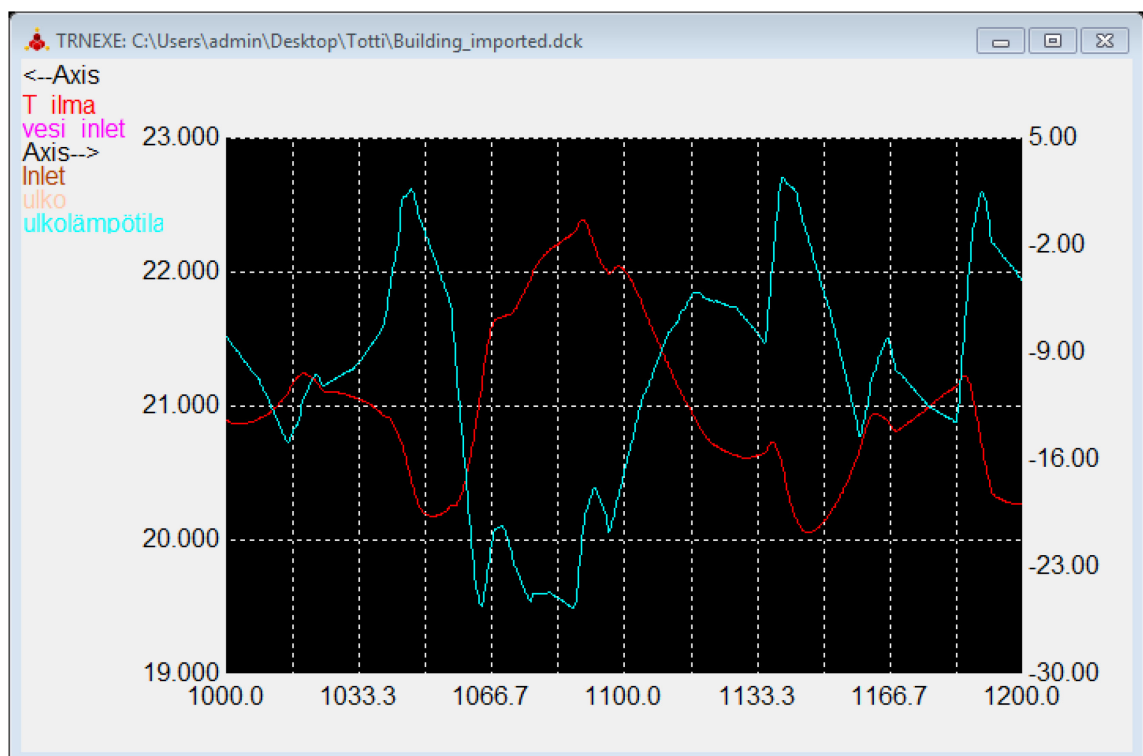
Kuvassa 21 on kuvattu rakennuksen sisälämpötilaa aikavälillä 800-1200 h. Ennen ajanhetkeä 1000 h menoveden lämpötilaa säädetään suoran  $T_m = -0,5T_u + 30$  avulla. Suora pitää lämpötilan lähes vakiona (19 °C), mutta liian alhaisena asetusarvoon nähden. Tilanteessa ei ole säteilyä eikä häiriöitä. Ilmanvaihto on säädetty tasaiseksi 0,5 1/h. Ajanhetkellä 1000 h menoveden lämpötilaa aletaan ohjata tilakoneeseen perustuvan säätötavan mukaisesti. Kuvasta 21 näkyy kuinka sisälämpötilan arvo ohjautuu lähelle asetusarvoa (20 °C).



Kuva 21 Perinteinen säätö suoralla  $T_m = -0,5T_u + 30$  ja tilakonesäätö

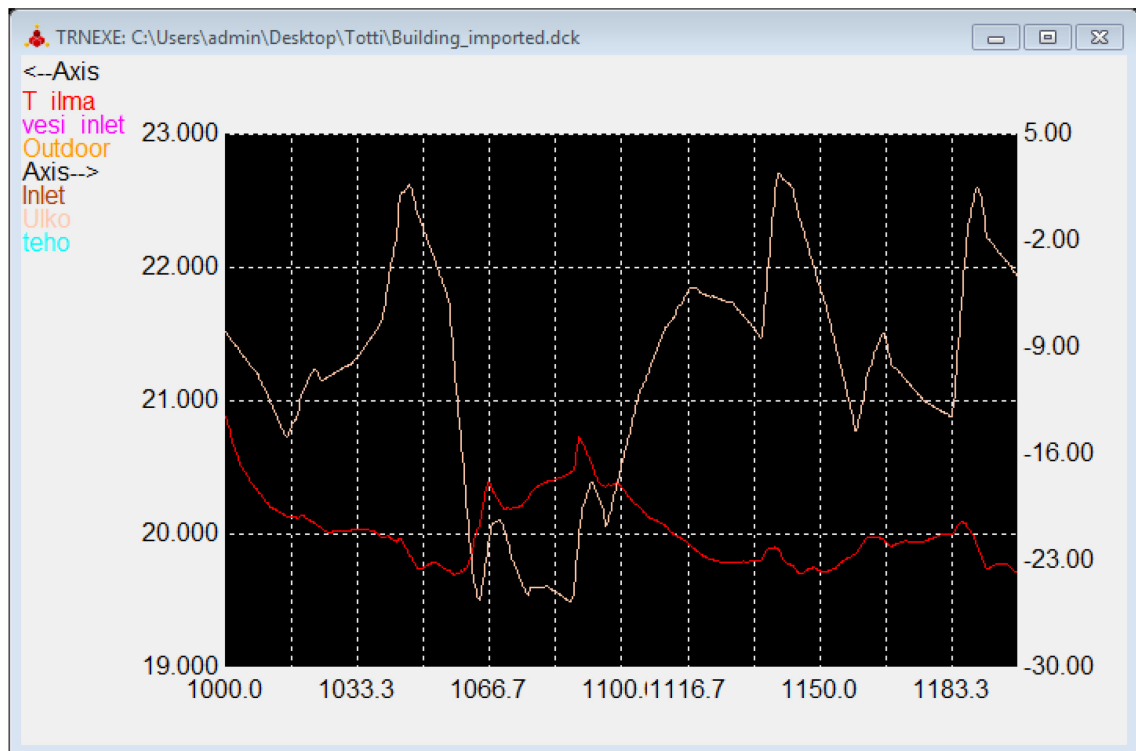
Tilakonesäätö pystyy korjaamaan säädön toimintaa, jos säätösuoran kulmakerroin on valittu väärin. Suora, jonka kulmakerroin ei ole kohdallaan, aiheuttaa suurimman virheen menoveden lämpötilaan ulkolämpötilan ääriarvojen läheisyydessä.

Kuvassa 22 on säätösuoraksi valittu liian suuren kulmakertoimen omaava suora:  $T_m = -0,8T_u + 32$ . Säätösuora säätää menoveden lämmitysveden liian korkeaksi kun ulkolämpötila laskee ja näin lämmitysteho nousee liian korkeaksi ja sisälämpötila nousee, samoin energiankulutus. Kuvissa 22 ja 23 on esitetty sisä- ja ulkolämpötila kevyessä rakennuksessa. Punainen käyrä on sisälämpötila ja turkoosi on ulkolämpötila. Sisälämpötila on vasemmalla akselilla (°C) ja ulkolämpötila oikealla akselilla (°C).



**Kuva 22 Perinteinen säätö suoralla  $T_m = -0,8T_u + 32$**

Kuvassa 23 on sisälämpötila vastaavasta tilanteesta, jossa menoveden lämpötilaa on säädetty tilakoneeseen perustuvan lämpödynaamisen mallin mukaisesti samalla aikavälillä kuin aikaisemmassa kuvassa 22, jossa säätö on tapahtunut suoralla  $T_m = -0,8T_u + 32$  mukaan. Kuvia 22 ja 23 vertailemalla huomaa kuinka malli tasoittaa kovilla pakkasilla suoralla säädettäessä helposti syntyvät yllilämmityshuiput. Sisälämpötila pysyy lähellä asetusrvoa 20 °C, vaikka ulkolämpötila vaihtelee voimakkaasti.



Kuva 23 Tilakonesäätö

## 8.2 Säädön toiminta ulkolämpötilan muuttuessa askelmaisesti

Tässä osiossa tarkoituksena on luoda mahdollisimman yksinkertainen tilanne, jossa on vähän muuttujia ja muutokset ovat hallittuja. Näin pystytään helpommin ja tarkemmin seuraamaan systeemin toimintaa. Systeemistä on poistettu säteilyn vaikutus kokonaan ja ulkolämpötilan arvo on muunneltu halutuksi.

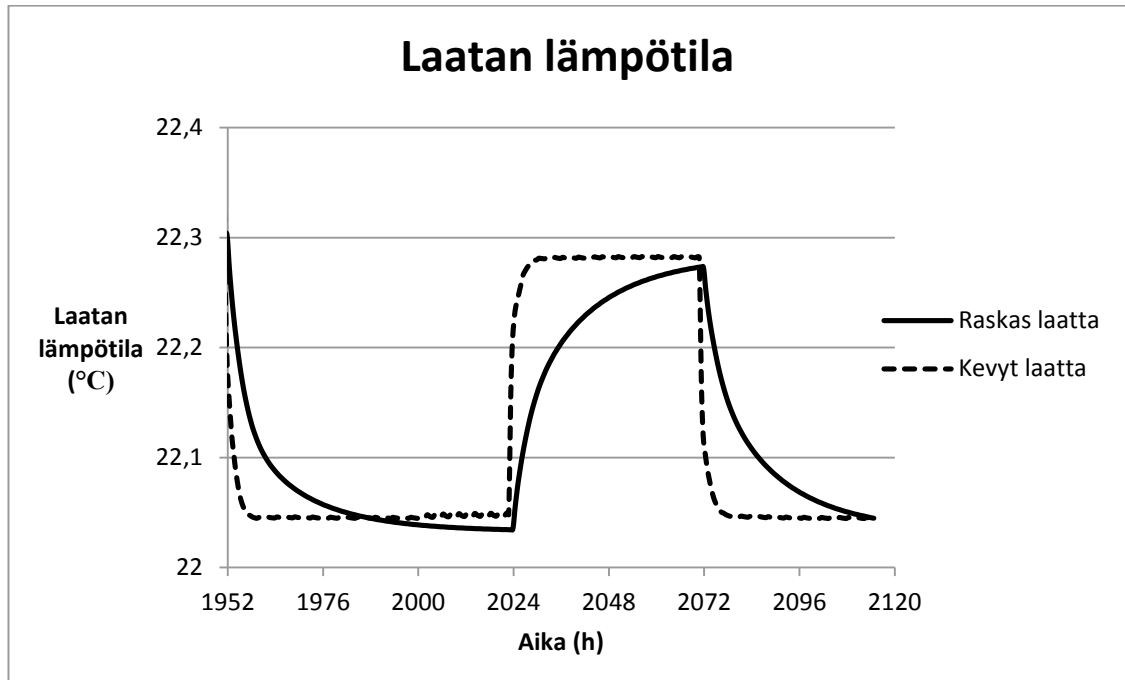
Manipuloimalla säätiedostoa on luotu ulkolämpötilan arvoon pulssimainen muutos, jossa lämpötila pysyy ensin arvossa 0 °C kolme vuorokautta, sen jälkeen lämpötila laskee -3 °C kahdeksi vuorokaudeksi ja nousee sen jälkeen takaisin 0 °C kahdeksi vuorokaudeksi. Menoveden lämpötila muuttuu aina ulkolämpötilan muutostilanteessa, mutta pysyy muutoksen jälkeen vakioarvossa seuraavaan muutokseen asti kuten kuvassa 25, mutta ilman ennakkointia.

Kolmen ensimmäisen vuorokauden aikana rakennuksen lämpövirrat saavuttavat tasapainon ja sisälämpötila hakeutuu vakioarvoon. Tämän jälkeen ulkolämpötila lasketaan nopeasti pakkaselle ja annetaan rakennuksen taas löytää tasapainotila. Kun rakennuksen lämpötilat ovat seuraavan kahden vuorokauden aikana tasoittuneet, nostetaan lämpötila takaisin nollaan asteeseen. Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään laatan massiivisuuden vaikutusta sisälämpötilan arvoon hyppäyksessä molempiin suuntiin ja mahdollisuutta ennakoida ulkolämpötilan muutosta.



### 8.2.1 Kevyen ja massiivisen rakenteen vaikutus

Massiivisuuden vaikutuksen tutkimisessa laatan massiivisuutta vaihdeltiin 1650 kJ/K ja 15000 kJ/K välillä. Pienempi arvo vastaa kevyen puurakenteisen laatan lämpökapasiteettia ja suurempi arvo raskaan betonilaatan lämpökapasiteettia. Rakennuksena käytettiin kevytrakenteista rakennusta ja ainoastaan laatan massiivisuutta vaihdeltiin.



**Kuva 24 Laatan lämpötila**

Kuvasta 24 huomataan kuinka massiivinen laatta lämpenee ja jäähtyy selkeästi kevyttä laattaa hitaammin. Kevyt laatta saavuttaa huippuarvonsa muutamissa tunneissa. Massiivisella laattalla lämpeneminen kestää lähes kaksi vuorokautta ja palautuminen noin vuorokauden. Laatan lämpenemisnopeus ja käyrän muoto kertovat TRNSYSin lattialämmityskomponentin matemaattisen mallin yksinkertaistuksista ja puutteista. Laatta lämpenee todellisessa tilanteessa suuremmalla viiveellä ja lämpötilan huippuarvo on pienempi. Kokeiluissa oli mukana myös tilanne, jossa rakennuksena oli massiivinen rakennus ja laattana raskas betonilaatta. Rakennuksen massiivisuudella ei havaittu tässä tilanteessa olevan suurta vaikutusta sisäilman käyrän muotoon.

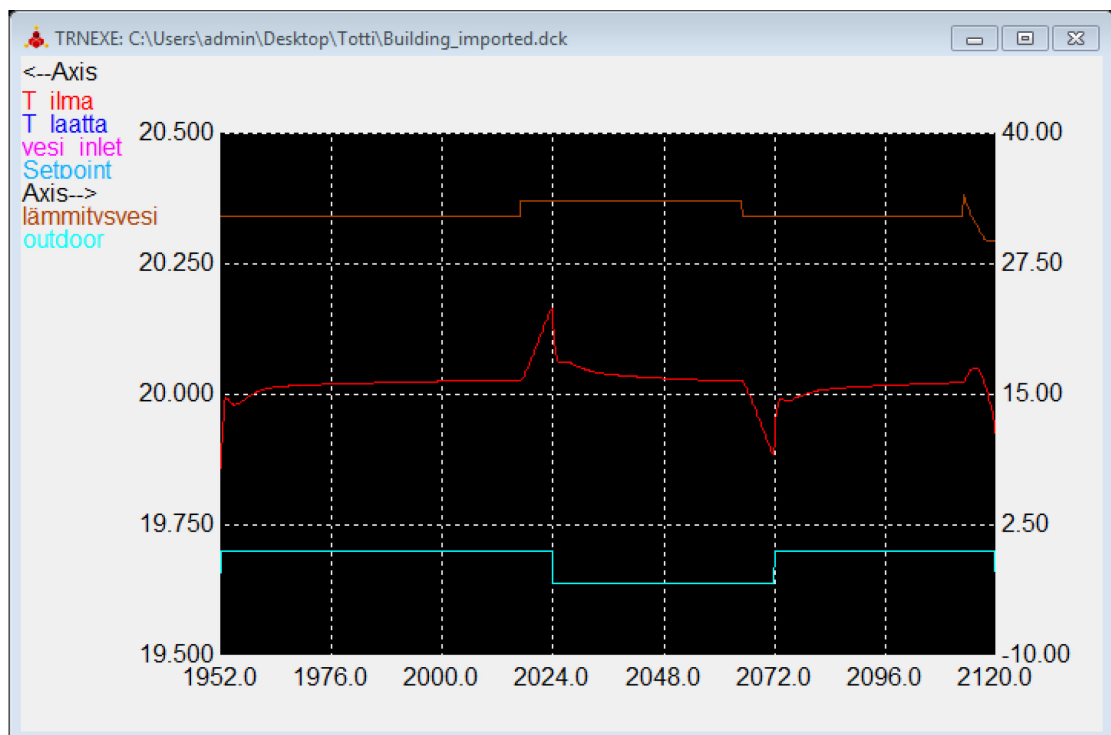
### 8.2.2 Sääennusteen hyödyntäminen tilakonesäädössä

Kuten aikaisemmin on kerrottu, tilakonesäätö toimii niin että identifiointivaiheessa tallennetaan tulotietojen kombinaatioita ja poimitaan prediktiointivaiheesta sieltä haluttu kombinaatio ja säädetään menoveden lämpötila näiden avulla. Sääennusteen hyödyntäminen tilakoneessa toimii siten, että tallennetaan ulkolämpötilan tulevia arvoja kombinaatioihin ja ohjataan niiden avulla etukäteen lämmitystä oikeaan suuntaan. Näin pystytään ennakoimaan

sään aiheuttamia tulevia lämmitystarvemuutoksia. Malli muuttuu epävakaaaksi, jos tallennetaan arvoja liian kaukaa tulevaisuudesta. Sääennusteet ovat todellisessa tilanteessa aina epävarmoja. Tutkimuksessa käytetyt ennusteet ovat absoluuttisen oikeita eikä virheitä esiinny.

Sääennusteen tarpeellisuuden arvioinnissa käytettiin eripituisia lämmityksen ohjauksen ennakointiaikoja. Ajat olivat 0, 1, 3, 5, 7 ja 8 tuntia. Testauksessa käytettiin kevyttä rakennusta ja siihen asennettua massiivista lattialaattaa. Kevyellä laattalla viivettä ei oikeastaan ole (kuva 24), joten kevyt laatta jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

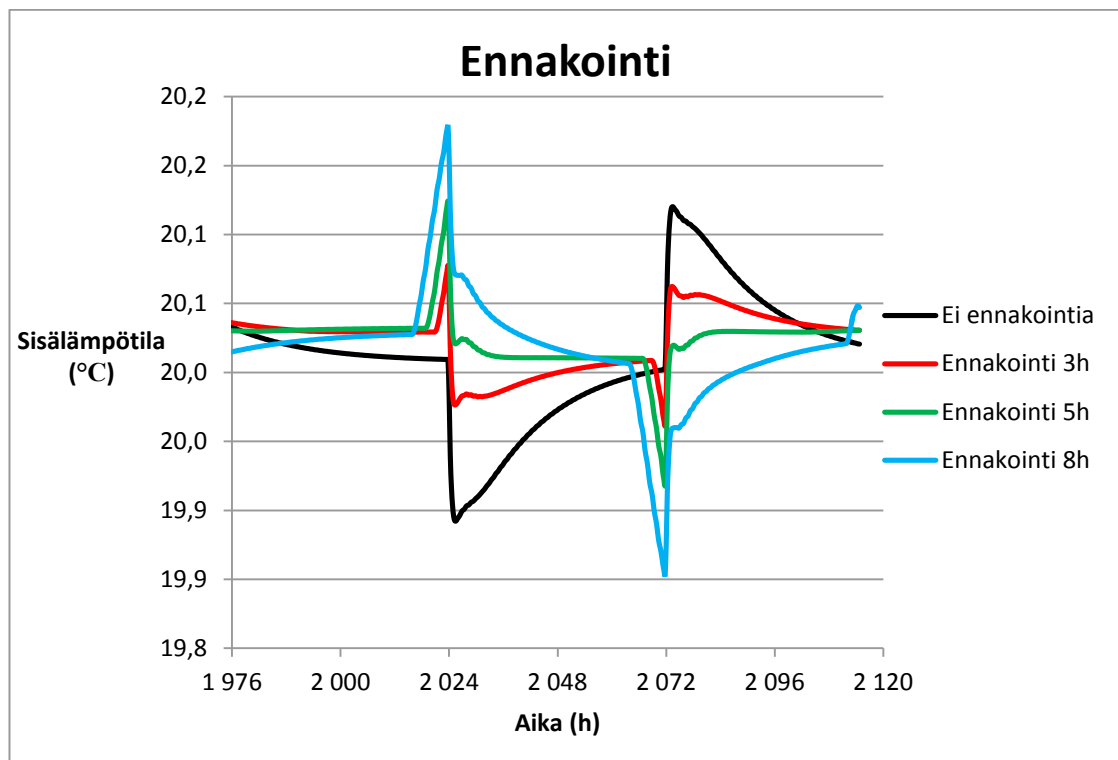
Kuvassa 25 näkyy ulkolämpötila, lämmitysveden lämpötila ja sisälämpötila aikavälillä 1952-2120h. Kuvasta huomaa hyvin ohjauksen ennakkoinnin alkamisajankohdan, sillä lämmitysveden lämpötila nousee ennen kuin ulkolämpötila laskee. Ennakointia tapahtuu myös myöhemmin, ennen kuin ulkolämpötila alkaa nousta askelmaisesti. Kuvasta 25 näkee kuinka sisälämpötila saadaan nostettua ennen ulkolämpötilan laskua ja näin saadaan estettyä sisälämpötilan lasku alle asetusarvon. Tilanteessa ennakointiaika on hieman liian suuri, koska sisälämpötila ehtii nousta liikaa ennen ulkolämpötilan laskua. Kun ulkolämpötila pysyy vakiona, myös mallin antama menoveden lämpötila on vakio. Tämä johtuu mallin toiminnasta. Mallin taulukkoon on tallennettu ko. kombinaatioiden paikalle läheltä löytyvä arvo. Taulukosta haettu osoite pysyy samana kun ulkolämpötila pysyy vakiona.



Kuva 25 Tilakonesäätö ennakointi 7h

Kuvassa 26 on neljän eri simulointitilanteen sisälämpötilan arvot samalla ajanhetkellä. Ainoa muuttuva tekijä on ennakkointiajan pituus. Kuvasta huomataan kuinka liian pitkällä ennakkointiajalla (8 h) lämpötila ehtii ennen ennakoitavan tilanteen alkua muuttua liikaa. Jos taas ennakkointiaika on liian lyhyt (3 h), ennakkointi ei ehdi vaikuttaa tarpeeksi. Raskaalla laaatalla lämmittäessä simulointitilanteessa parhaaksi ennakkointiajaksi löytyi 5 tuntia. Tällöin sisälämpötila tasaantuu lähelle 20 °C nopeimmin.

Tutkitussa tilanteessa (kuva 26) sisäilman muutokset ovat pieniä, mutta havainnollistavat tilannetta hyvin. Käytännön tilanteessa näin pienillä muutoksilla ei viihtyisyyden kannalta ole merkitystä, mutta lämmityksen ja säädön periaatteita miettiessä erot käyrissä kertovat paljon systeemin toiminnasta.



**Kuva 26 Ennakointi**

On kuitenkin huomattava, että Kuvan 26 esittämä tilanne ei ole todellinen. Ulkolämpötilan muutosten välillä on kaksi vuorokautta, joten tilanne rakennuksen lämpövirroissa ehtii tasoittua. Tämä on merkitsevää, kun mietitään ennakkoinnin hyötyjä. Seuraavassa kappaleessa tutkitaan miten ennakkointi vaikuttaa, jos muutoksia tapahtuu nopeammalla sekvenssillä.

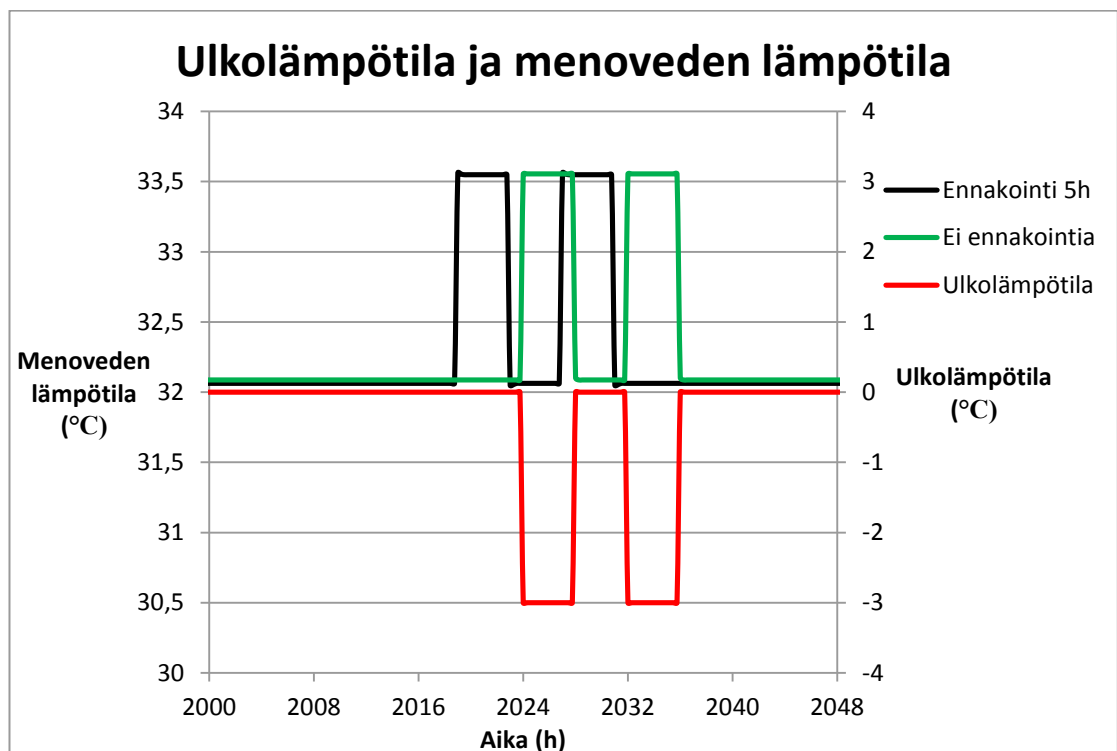
### **8.2.2.1 Ennakoinnin haitat**

Kuvasta 26, nähdään että jos ennakoidaan liian aikaisin, sisälämpötila ehtii nousta liian paljon tilanteessa, missä lämmitystehoa nostetaan ennen sään kylmenemistä ja sisälämpötila ehtii

laskea liikaa, jos ennakointiaika on liian pitkä tilanteessa missä lämmitystehoa lasketaan ennen sään lämpenemistä.

Jos muutokset ovat nopeampia kuin mitä tarvittava ennakointiaika on, säätöön tulee tilanteita, jolloin lämmitetään, vaikka ulkolämpötila on korkealla ja vähennetään lämmitystehoa, vaikka ulkolämpötila on reilusti pakkasella. Ennakointi ei siis välttämättä pysy muutoksissa mukana, jos muutosten tapahtumaväli on pienempi kuin ennakointiin tarvittava aika. Raskaalla laaatalla tarvittava ennakointiaika on 3-5h. Kevyellä tarvittava ennakointi aika on selkeästi lyhyempi. Koska ennakointiaika on niin lyhyt, ei ennakkoinnista havaittu myöskään olevan mitään hyötyä.

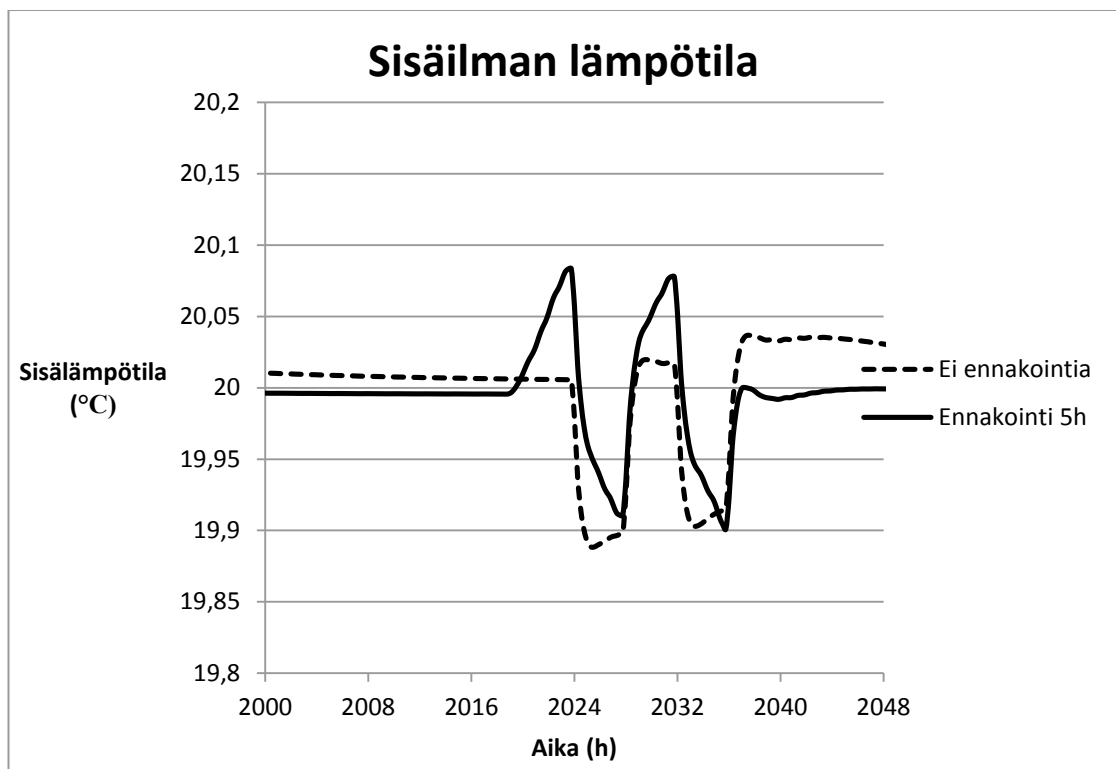
Kuviin 27 ja 28 on luotu kuvitteellinen tilanne, jossa ulkolämpötila muuttuu neljän tunnin välein nollasta celsiusasteesta miinus kolmeen celsiusasteeseen ja takaisin ja uudestaan samalla tavalla. Kaikki muutokset tapahtuvat neljän tunnin välein. Ennakointiaikana käytettiin viittä tuntia, joka on tunnin pidempi kuin muutosten tapahtumaväli. Käytännössä ulkolämpötilan muutokset eivät ole näin säännöllisiä, mutta muutosnopeus ja lämpötilojen muutos on täysin realistinen. Parhaimmillaan ulkolämpötila voi muuttua Suomessa päivän aikana jopa 36,5 °C. [32] Se tekee keskimäärin yhdelle tunnille 1,52 °C muutoksen. Eli teoriassa lämpötila ennättää neljän tunnin aikana laskea kolme celsiusastetta ja nousta samat kolme celsiusastetta.



Kuva 27 Ulkolämpötila ja menoveden lämpötila

Kuvasta 27 näkee hyvin kuinka viiden tunnin ennakkolla lämmitysteho on alhaisimmillaan juuri silloin kun ulkolämpötila on pienimmillään ja lämmitysteho suurimmillaan kun ulkolämpötila on korkeimmillaan. Ilman ennakointia lämmityshuiput ovat ulkolämpötilanotkojen kanssa samassa kohdassa.

Kuva 28 esittää edellä kuvattujen tilanteiden vaikutusta sisälämpötilan arvoon. Sisälämpötila alkaa heilahdella nopeissa muutoksissa kun ennakointiaika on 5 tuntia. Sisäilman lämpötilan pienimmän ja suurimman arvon ero lähes kaksinkertaistuu. Tämä johtuu siitä, että tilakonesäätö pyrkii ennakoimaan tulevaa ulkolämpötilan nousua laskemalla lämmitysveden lämpötilan alas, vaikka ulkolämpötila on vielä alhaalla. Ulkolämpötilan muuttuessa lämpimämmäksi lämmitysveden lämpötila nostetaan korkeaksi, koska ennakoidaan jo tulevaa ulkolämpötilan laskua. Kun malli aloittaa taas uuden ennakkoinnin, ei laatan lämpötila ole vielä ehtinyt saavuttaa lämmitystehon kannalta oikeaa lämpötilaa. Erot sisäilman lämpötiloissa ovat pieniä, mutta selkeitä.



**Kuva 28 Sisäilman lämpötila**

Johtuen aikaisemmin mainituista asioista ohjauksen ennakkoinnista ei ole hyötyä tilanteessa, jossa muutosten vaihteluväli on pieni. Ennakoinnista on apua vain tilanteessa, missä ulkolämpötila pysyy muutoksen jälkeen riittävän kauan tasaisena. Jos lämpötila vaihtelee

edestakaisin, ei ohjauksen ennakointi pysy mukana. Tällöin sisälämpötila lähtee värähtelemään kuvan 28 mukaan.

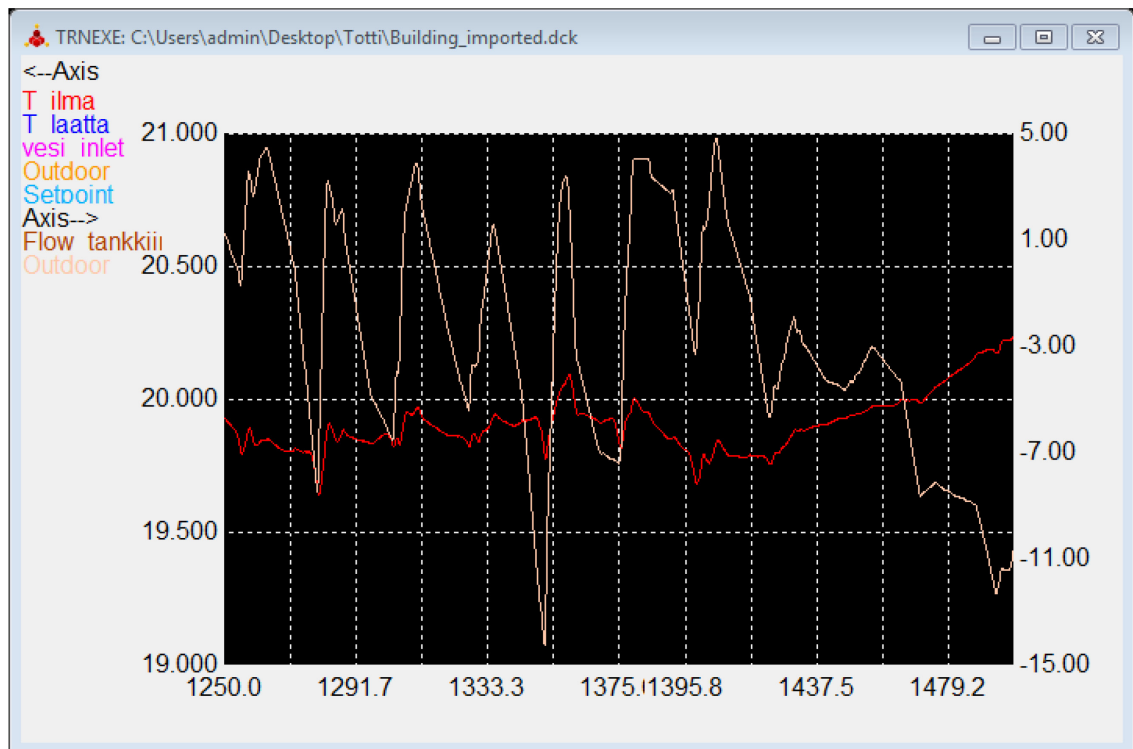
Tilannetta tutkittiin myös muuttamalla ohjauksen ennakointiaikaa (ja vastaavaa ulkolämpötilaennusteen aikaväliä). Jos ennakointiajan lyhentää tuntiin, ei mainittavaa muutosta ole havaittavissa verrattuna tavalliseen tilanteeseen, jossa ohjausta ei ennakoida ollenkaan. Jos vaihtaa ennakointiajan 3 tuntiin, niin tulos on lähes sama kuin viiden tunnin ennakoinnilla. Tunti voisi toimia, mutta ennakointi aika on liian lyhyt, jotta rakennus ehtisi reagoida. Värähtelyltä luultavasti kuitenkin välttyttäisiin. Ohjauksen ennakointiaika 5 h on havaittu aikaisimmissa simuloinneissa parhaaksi ajaksi kyseiselle simuloitavalle rakennukselle. Viiden tunnin aikana rakennus ehtii reagoida muutokseen riittävästi, muttei liikaa.

### **8.2.3 Ennakointi todellisessa tilanteessa**

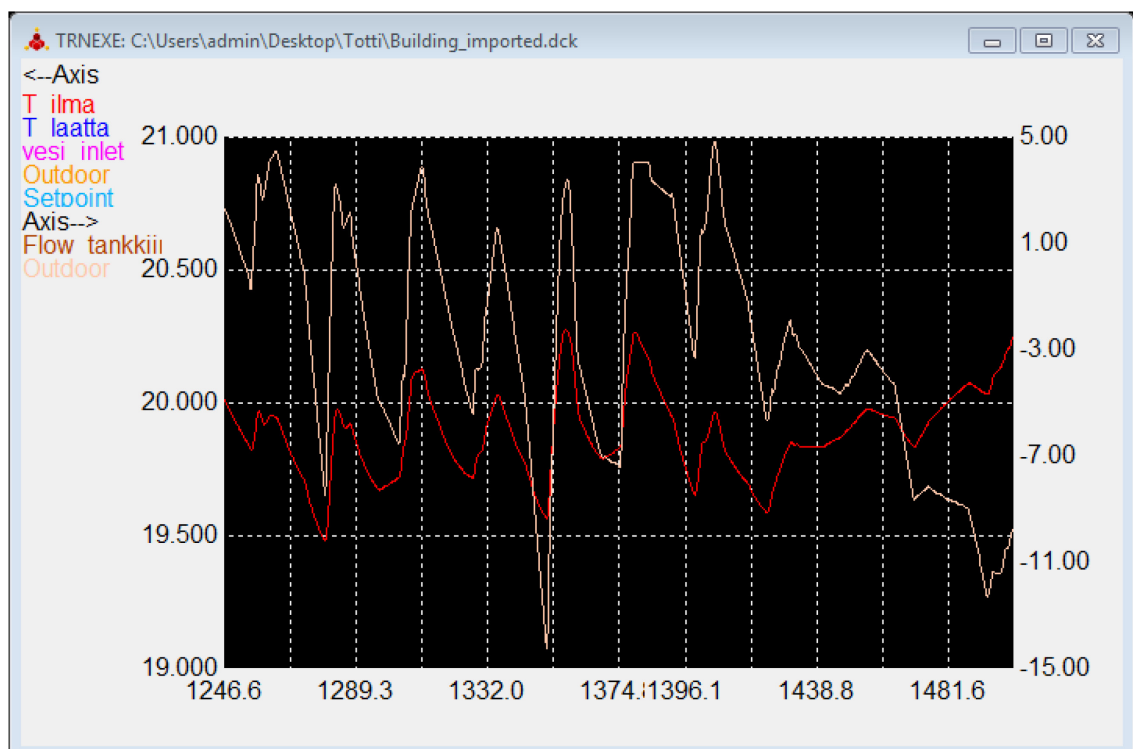
Todellisessa tilanteessa ulkolämpötila muuttuu välillä nopeasti ja välillä muutokset ovat pysyviä. Edellä esitetyt simuloinnit on tehty itse luodulla säätiedostolla, jossa säätilan muutokset ovat haluttuja. Alla olevissa kuvissa 29 ja 30 on simuloitu tilannetta todellisen kaltaisella säätiedostolla. Rakennuksena on käytetty kevyttä rakennusta ja laattana massiivista laattaa. Simulointi on tehty 3 tunnin ohjauksen ennakoinnilla (kuva 29) ja ilman ennakointia (kuva 30). Kuvia 29 ja 30 vertailemalla näkee selvästi, että ennakoinnilla saadaan sisäilman vaihtelu pidettyä pienempänä. Ilmeisesti muutokset ulkolämpötilassa ovat kohtuullisen pysyviä, koska ennakointi toimii noinkin hyvin. Sisäilman lämpötilan huiput ja notkot jäävät ennakoinnilla selkeästi pienemmiksi.

Ennakointi raskaalla laattalla näyttäisi tuottavan hyviä tuloksia todellisella ulkolämpötilan vaihtelulla. Laatan lämpenemiseen kuluva viivettä saadaan ennakoinnin avulla poistettua. Muutosten nopeus ei todellisessa tilanteessa pilaa säätöä kuten kuvassa 28, vaikka säätöä ennakoidaan.

Todellisessa tilanteessa kolme tuntia näyttäisi olevan paras ennakointiaika. Viisi tuntia näytti aikaisemmalla säätiedostolla, johon oli luotu porras ulkolämpötilaan, parhaalta, mutta kolme tuntia osoittautui paremmaksi todellisella ulkolämpötilan vaihtelulla simuloitavalle rakennukselle. Kolmella tunnilla tulokset olivat kohtuullisen hyviä myös itse tehdyllä säätiedostolla. Se vaikuttaisi olevan sopiva, koska sillä ehditään ennakoida laatan lämpenemiseen menevää aikaa riittävästi ja pysytään silti ulkolämpötilan muutoksissa mukana.



Kuva 29 Ennakointi 3h



Kuva 30 Ei ennakointia

## 9 Häiriöt

Häiriöillä tarkoitetaan tässä rakennuksen käytöstä ja toiminnasta aiheutuvia muutoksia rakennuksen lämmitysolosuhteissa. Häiriöitä ovat mm. ilmanvaihdon muutokset, ihmisten sisäilmaa lämmittävä vaikutus ja koneiden ja valaistuksen aiheuttamat lämpökuormat.

TRNSYS:ssä voidaan edellä mainittuja häiriöitä liittää mukaan rakennuksen simulointiin laatimalla kunkin häiriön esiintymiselle viikko- ja/tai vuorokausirytmii ja vaihtelemalla häiriön intensiteettiä. Rakennuksen on oletettu toimivan sekä asuin- että työskentelytilana. Päivisin siellä työskentelee tietokoneella kaksi ihmistä, iltaisin kaksi ihmistä viettää vapaa-aikaa ja öisin kaksi ihmistä nukkuu. Valaistuksen lämmitysvaikutukseksi on valittu 13 W/m<sup>2</sup>.

Häiriöt on säädetty seuraavasti:

Klo. 0-8:

- Ilmanvaihto 0,5 1/h
- Kaksi ihmistä nukkuu
- Koneet ovat pois päältä
- Valaistus pois päältä

Klo. 8-16:

- Ilmanvaihto 1,0 1/h
- Kaksi ihmistä työskentelee rauhallisesti
- Kaksi tietokonetta 2\*230 W
- Valaistus 13 W/m<sup>2</sup>

Klo. 16-24:

- Ilmanvaihto 0,5 1/h
- Kaksi ihmistä työskentelee rauhallisesti
- Yksi tietokone päällä 230 W
- Valaistus 13 W/m<sup>2</sup>

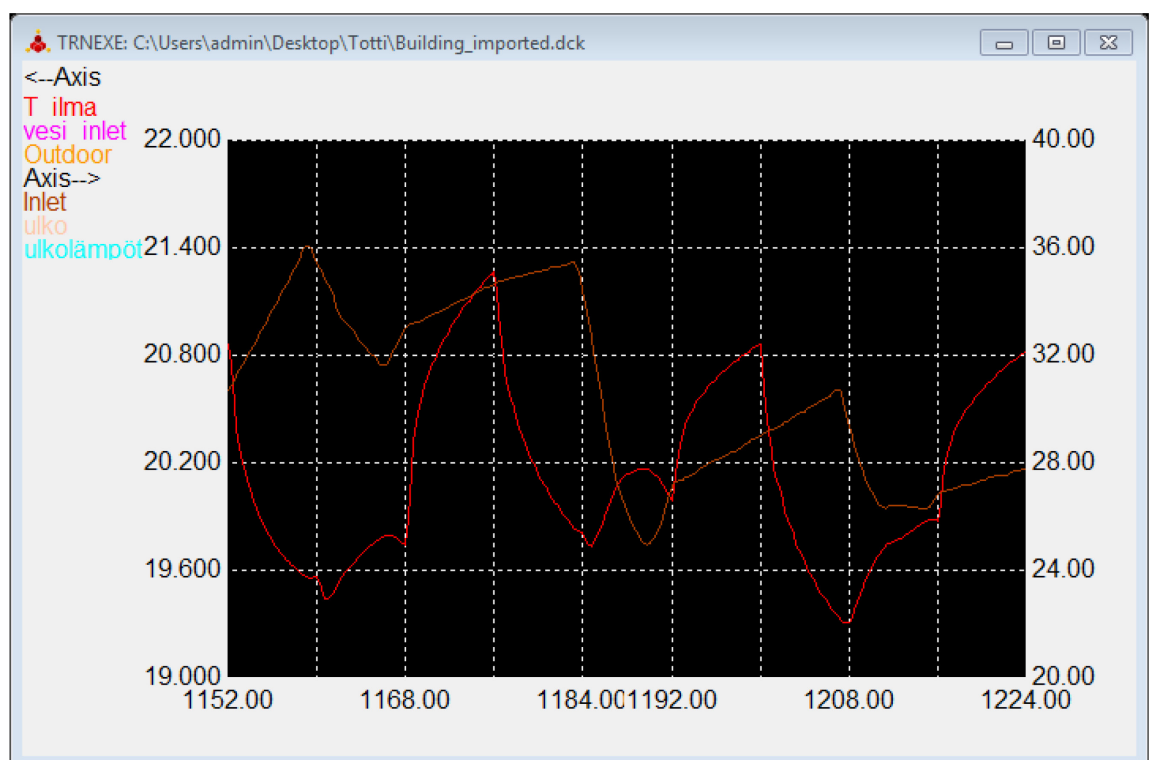
Häiriöt on valittu niin, että rakennukseen tulisi kolme toisistaan poikkeavaa lämpöasetapausta, jotta pystyttäisiin tutkimaan rakennuksen käyttäytymistä mahdollisimman monipuolisesti. Yksi matalan tehon tilanne öisin, jolloin lämpökuormitus on vähäistä. Päivällä



tilanne, jossa on paljon lämpökuormaa, mutta ilmanvaihto tasoittaa lämpötasetta. Kolmas tilanne syntyy illalla, jolloin on paljon lämpökuormaa, mutta ilmanvaihto ei ole tehostetusti päällä.

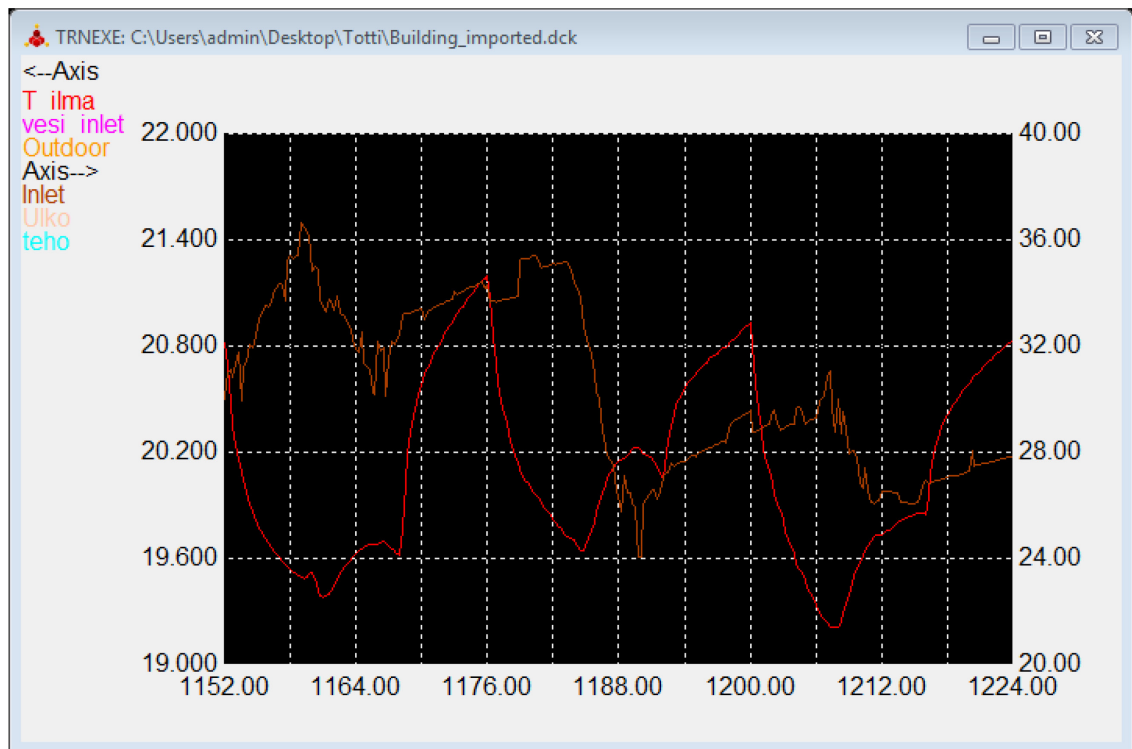
## 9.1 Häiriöiden vaikutus

Kuvassa 31 on kuvattu sisäilman lämpötilaa ja lämmitysveden lämpötilaa kolmen vuorokauden ajan. Punainen käyrä on sisäilman lämpötila (°C) ja ruskea käyrä menoveden lämpötila (°C). Simulointitilanteessa on oletettu, että auringon säteilyä ei ole ollenkaan olemassa, jotta häiriöiden vaikutukset näkyisivät selkeämmin. Menoveden lämpötilaa on säädetty perinteisen säätömenetelmän mukaisesti suoralla  $T_m = -0,7T_u + 26$ .



**Kuva 31 Häiriöiden vaikutus perinteinen säätö**

Ensimmäisen kahdeksan tunnin aikana sisälämpötila laskee, koska laitteet ja valaistukset ovat pois päältä. Seuraavan kahdeksan tunnin aikana lämpötila hieman nousee, koska valaistus ja laitteet lämmittävät sisäilmaa. Lämpötilan nousu on maltillista, koska ilmanvaihto on tehostetusti päällä. Vuorokauden viimeisen kahdeksantuntisen aikana sisälämpötila nousee reilusti, koska valaistus on päällä ja ihmiset sisällä, ilmanvaihto ei kuitenkaan ole tehostetusti päällä. Kuvasta 31 huomaa kuinka selkeästi häiriöt vaikuttavat sisäilman lämpötilaan. Häiriöiden huomioon ottaminen lämmityksessä on tästä syystä oleellista.



**Kuva 32 Häiriöiden vaikutus tilakonesäätö**

Kuvassa 32 on kuvattu tilakonesäädön toimintaa samalla ajanhetkellä ja samassa tilanteessa kuin kuvassa 31. Kuvien sisälämpötilakäyriä vertaamalla huomaa, että tilakonesäätö ei toimi yhtään paremmin kuin perinteinen suoran avulla tapahtuva säätö, sillä häiriöiden vaikutusta ei oteta tilakoneen mallissa huomioon. Tilakonesäätö pyrkii tasoittamaan häiriöiden vaikutusta, kuten menovesikäyrien eroavaisuuksista huomataan. Tallennusaikana käytettiin 1500 h. Näytteitä oli käytettävissä  $4 \cdot 1500 \text{ kpl} = 6000 \text{ kpl}$ .

## 9.2 Tilakonesäädön toiminta häiriötilanteessa

Eri häiriöt otetaan tilakoneeseen perustuvassa säädössä huomioon niin, että mitataan riittävän pitkä ajanjakso, jolloin tulee mahdollisimman paljon samanlaisia tilanteita, joissa häiriöiden vaikutukset vaihtelevat. Identifiointimallia luodessa tilakonesäätö laskee tilanteista keskiarvoja ja näin häiriöiden vaikutus tulisi pienentyä. Tilakonesäätö pyrkii pienentämään sisälämpötilan erotusta asetusarvosta. Tämän seurauksena mallin tulisi oppia tilanteista, joissa lämpötila häiriöiden takia nousee yli asetusarvon tietyllä menoveden lämpötilalla ja laskemaan menoveden lämpötilaa. Ongelmia tulee, kun häiriöiden aiheuttamaa lämpökuormaa ei olekaan ja säätö olettaa lämpökuorman olevan keskiarvon arvoinen. Samoin ongelmia säädössä tulee, kun häiriöistä aiheutuva lämpökuorma on maksimiarvossa. Tämä vaatii pitkän tallennusajan, jotta mittauspisteitä tallentuu tarpeeksi ja tilanteita, joissa häiriöitä on, tulee riittävästi.

Simuloinnissa, jossa pyrittiin selvittämään mallin mahdollisuuksia parantaa säätöä häiriötilanteessa pitkällä tallennusajalla, käytettiin tallennusaikana 8000 h. Mittauspisteitä tuli siis  $8000 \cdot 4 = 32000$ . Mittauspisteitä oli riittävästi. Mittauspisteiden laadussa oli puutteita, sillä mittausajankohtana jouduttiin käyttämään myös kesää. Kesällä lämmitysveden lämpötila laskee minimiin, joka on 23 °C. Sisälämpötila nousee silti ulkolämpötilan ansiosta. Tilakonesäätö ei saa kesäajalta mallia parantavaa informaatioita lämmitysajalle.

Laskemalla residuaaleja pystytään pienempiäkin vaihtelueroja sisälämpötiloissa havaitsemaan. Residuaalilla tarkoitetaan asetusarvon ja sisälämpötilan erotusten summaa jokaisella aika-askeleella.

Sisälämpötilojen residuaalit aikavälillä 8000-8500 h:

Sisälämpötilan residuaali tilakonesäätö: 1342

Sisälämpötilan residuaali perinteinen säätö: 1373

Residuaaleissa ei ole juurikaan eroa. Häiriöiden vaikutusta sisäilman lämpötilaan tilakonesäätö ei siis kykene vähentämään. Jotta tilakonesäätö pystyisi pienentämään häiriöiden vaikutusta, tulisi malliin lisätä tulotiedoksi esim. ilmanvaihdon muutokset. Se on täysin mahdollista. Tulotietojen lisäys kasvattaa taulukon kokoa paljon. Ajanpuutteen vuoksi häiriöiden lisäystä mallin tulotiedoksi ei tässä tutkimuksessa tehty.

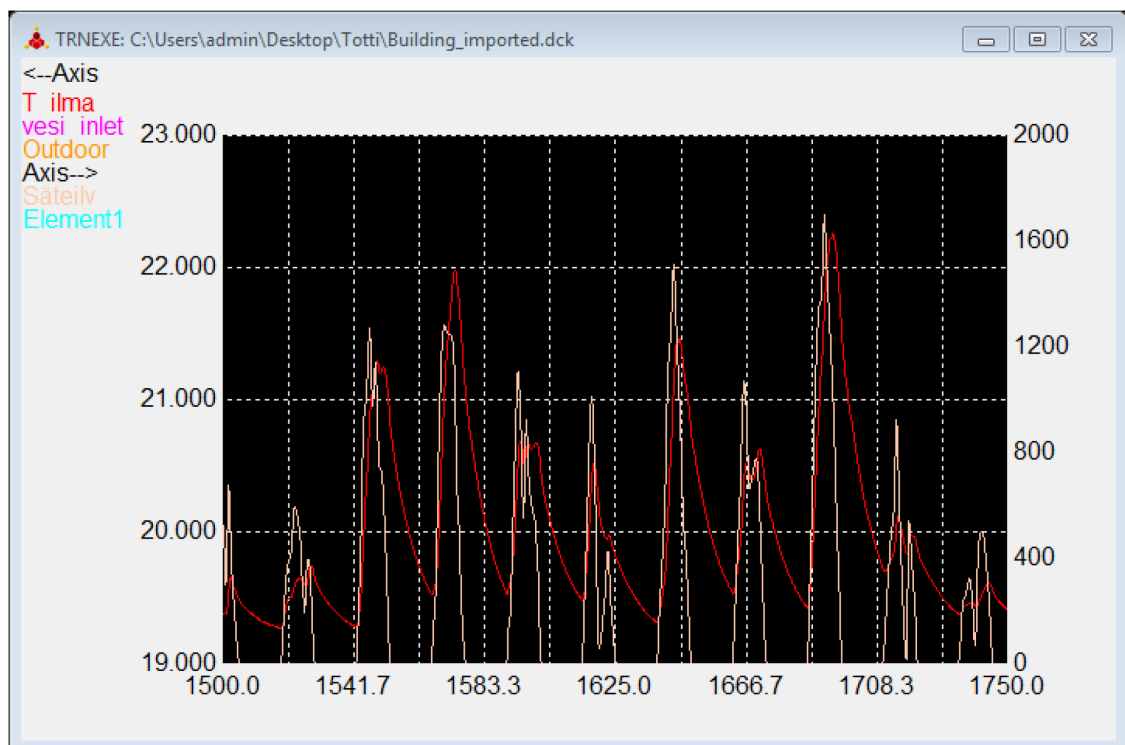
Valaistuksen tai ihmisten aiheuttaman lämpökuorman lisäyksen siirtäminen malliin on käytännön tilanteessa vaikeaa ja epäluotettavaa niiden luonteen takia. Mittaaminen on vaikeaa ja informaation saanti luotettavasti haastavaa.

## 10 Säteily

Säteilyllä tarkoitetaan tässä auringon diffuusia säteilyenergiaa, jonka vaikutuksesta eri pinnat lämpenevät. TRNSYS:ssä säteilytiedot tulevat säätiedostosta, josta ne jaetaan eri pinnoille niiden kaltevuuksien ja suuntien mukaan. Auringon säteilyn muutokset on nopeita. Suuren osan vuorokaudesta säteilyn määrä on pieni tai lähellä nollaa ja päivisin se nousee nopeasti huippuarvoonsa ja laskee takaisin nolliin. Kuvasta 33 näkee hyvin säteilyn luonteen. Auringon säteilyn vaihteluväli on 0-3000 kJ/(hr\*m<sup>2</sup>).

### 10.1 Suora

Säädettäessä lämmitystä perinteiseen tapaan säätösuoralla sisälämpötila saadaan täysin häiriöttömässä tilanteessa pidettyä lähes vakiona. Kun tilanteeseen lisätään auringon säteily, perinteinen säätömenetelmä huomaa auringon säteilyn ainoastaan ulkoilman lämpötilan nousun seurauksena. Säteily vaikuttaa voimakkaasti rakennuksen sisäilman lämpötilaan. Säätösuoralla säädettäessä siis lämmitetään liikaa säteilyn aikana ja tämä aiheuttaa ylimääräistä energiankulutusta. Lämpötilan nousu sisälämpötilassa saattaa päivisin olla useita asteita. Kuvassa 33 on esitetty sisälämpötila (°C) kevyessä rakennuksessa ja auringon säteily (kJ/(hr\*m<sup>2</sup>)).



**Kuva 33 Auringon säteily perinteinen säätö**

Kuvan aikaväli on 1500-1750 h, joten se ajoittuu helmikuun loppupuolelta maaliskuun alkuun. Auringon säteily on Suomessa tällöin vielä maltillista. Aikavälin säteilyn huippuarvo on n. 1600

$\text{kJ}/(\text{hr}\cdot\text{m}^2)$ . Säteilyn aikana sisälämpötila nousee selvästi. Nousu on kuvan 33 tilanteessa suurimmillaan jopa  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Auringon säteilyn vaikutus sisälämpötilaan on niin suuri, että sen huomioon ottaminen säädössä on tärkeää.

Säätösuoraa on mahdollista modifioida niin, että se antaa alemman lämmitysveden lämpötilan, jos säteilyä havaitaan. Ja näin lämmitystehoa säteilyn aikana saadaan laskettua.

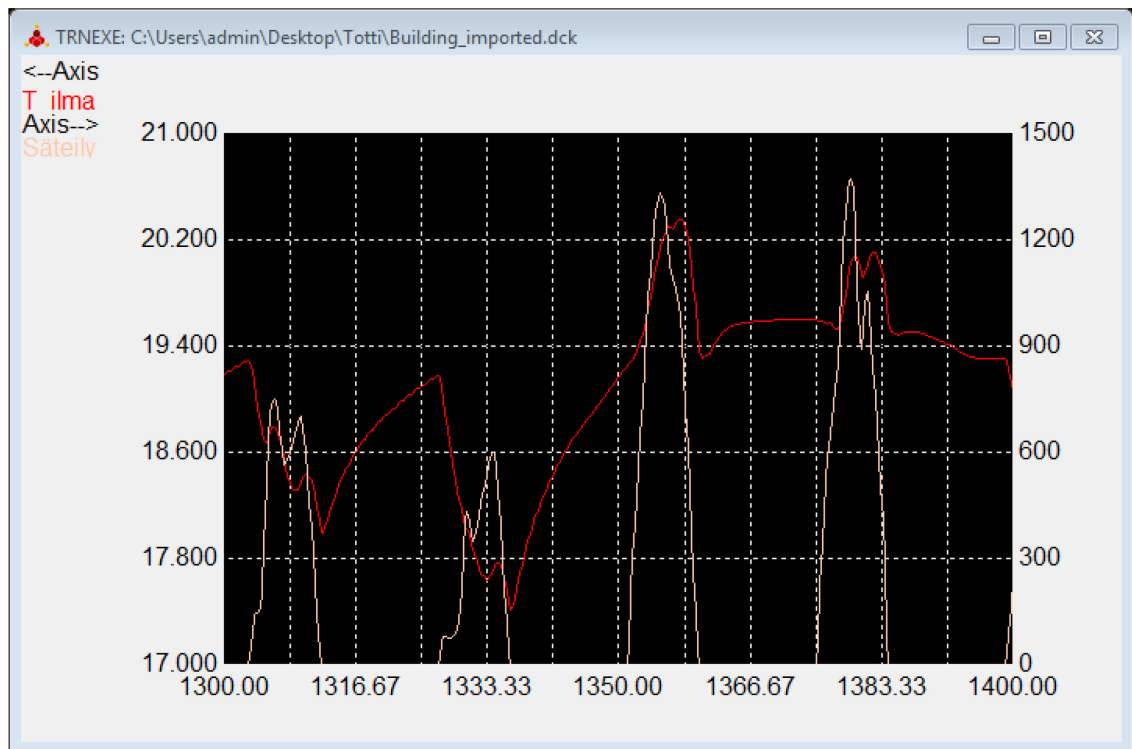
## 10.2 Modifioitu suora

Tarkoitus on alentaa lämmitysteho mahdollisimman alas säteilyn aikana, jotta välttyttäisiin yllilämmitykseltä. Lämmityksen ohjaus säteilytietoa hyväksi käyttäen vaikuttaa haasteelliselta. Säteilytieto täytyy ensin saada anturilta. Se ei nykytekniikalla ole ongelma, mutta ongelmat tulevat esiin siinä, kuinka säteilytietoa käytetään hyödyksi. Voidaanko aina kun aurinko menee pilveen tehdä muutoksia säädössä ja alennetaanko lämmitystehoa pienenkin säteilyn takia? Säteilyn vaikutus on hyvin nopeaa ja säädön pysyminen mukana on vaikeaa. Tämän takia tutkittiin myös ennakkointimahdollisuuksia.

Ideana on pienentää lämmitysteho lähes nollaan säteilyn aikana ja seurata miten eri rakennusten sisälämpötilat reagoivat. Kokeissa käytettiin myös säänennustusmahdollisuutta. Rakennuksina oli kevytrakenteinen puurankarakennus ja massiivinen betonielementtirakennus. Säätösuoraa modifioitiin niin, että kun säädin havaitsee säteilyä, se laskee lämmitysveden lämpötilaa  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tämä tarkoittaa sitä, että monissa tilanteissa lämmitysteho laskee lähes nollaan, kun auringon säteilyä havaitaan.

Kevyellä rakennuksella pienellä säteilyteholla saatiin sisälämpötila jopa laskuun auringonsäteilyn aikana. Kovina säteilyaikoina sisälämpötila nousi väkisin noin asteen, vaikka lämmitysteho oli lähes nollassa. Kuvasta 34 huomataan kuinka suuri vaikutus on säteilyn voimakkuudella. Jos säteily on vähäistä, sisälämpötila saadaan jopa laskuun, mutta kovilla säteilyn arvoilla lämpötila nousee.

Aikavälinä käytettiin 1300-1400 h, siis helmikuun loppua. Auringon säteilyllä on suuri vaikutus sisälämpötilaan myös talvella ja lämmityskaudella.



**Kuva 34 Modifioitusuora**

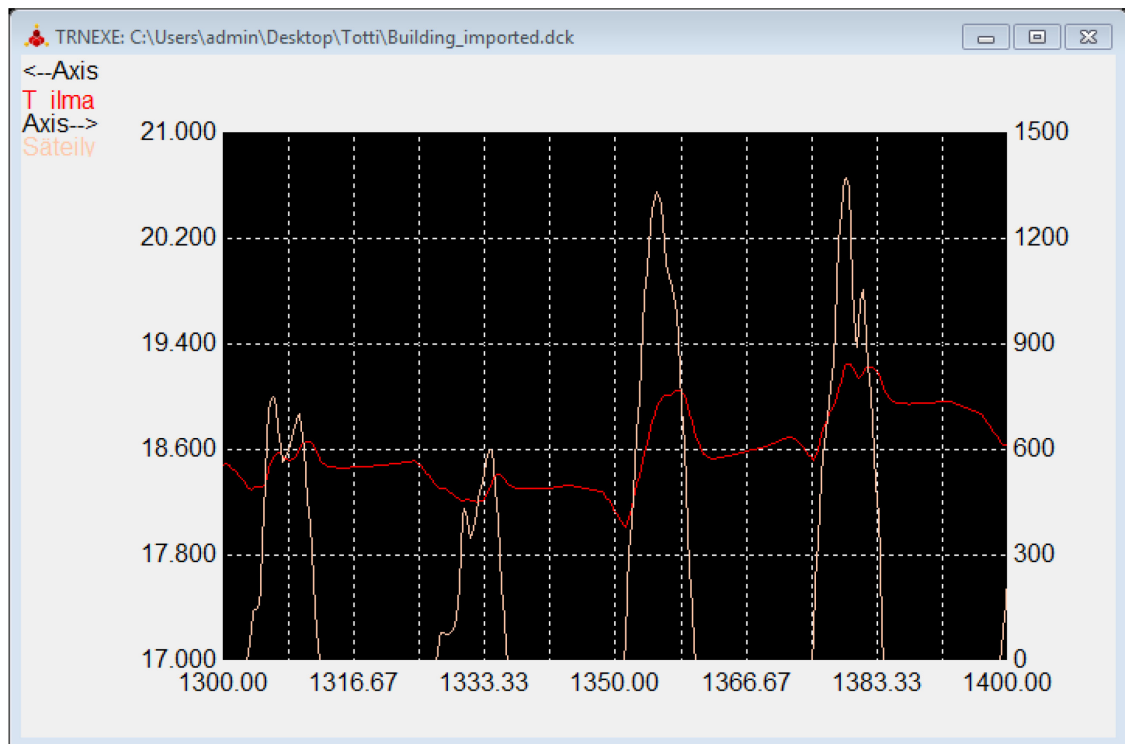
Raskaalla rakennuksella muutokset olivat hitaampia ja maltillisempia. Alhaisilla säteilytehoilla saatiin lämpötila pidettyä lähes tasaisena, mutta kovilla säteilyillä sisälämpötila nousi noin asteen, vaikka lämmitysteho oli lähes nolla. Lämmitystehon voimakkaalla laskulla voidaan siis vähentää sisäilman liian voimakasta lämpenemistä auringon säteilyn vaikutuksesta lämmityskaudella.

### 10.2.1 Ennakointi

Tarkoitus on laskea sisäilman ja rakenteiden lämpötilaa ennen säteilyn alkua, jotta rakennuksella olisi puskuria ottaa auringon antama energia vastaan ylikuumentumatta, säätämällä etukäteen menoveden lämpötilaa alhaisemmaksi.

Simuloinneissa käytettiin tunnin ja kolmen tunnin ennustusta. Komponentti sai säätiedot tulotietoina ennustusajan verran etukäteen. Säätietojen lukeminen etukäteen toteutettiin komponentilla TYPE 9. Ensin säätiedot tulostettiin TRNSYS erilliseen tiedostoon, josta hyppäämällä alusta rivejä päästiin käsiksi sääennustuksiin. Sääennusteet ovat siis absoluuttisen oikeita. Säteilyn ennustaminen käytännössä on vaikeaa, eikä virheiltä voi välttyä. Ulkolämpötila tulee komponentille reaaliajassa.

Ennakointia kokeiltiin raskaalle rakennukselle kolmella tunnilla ja kevyellä rakennuksella yhdellä tunnilla. Ajatus oli, että kevyen rakennuksen lämpötila lähtee nopeammin laskuun, joten ennakointijakson ei tarvitse olla niin pitkä kuin raskaalla rakennuksella.



**Kuva 35 Säteilyn ennakointi 3h modifioitusuora raskas rakennus**

3 tunnin ennakkoinnilla saatiin kohtuullisen hyviä tuloksia raskaalla rakennuksella (kuva 35). Lämmitysteho laskettiin lähes nollaan 3 h ennen säteilyn alkua. Kuvasta 35 näkee kuinka sisälämpötila laskee ennen säteilyn alkua ja lähtee taas nousuun säteilyn alkaessa. Puskurivaikutus näyttäisi toimivan. Lämpötila pysyi lähes vakiona pienillä säteilyn arvoilla. Isoilla säteilyn arvoilla sisälämpötila nousi, mutta ei niin paljoa kuin ilman ennakointia.

Kevyt rakennus reagoi niin aggressiivisesti lämmitystehon muutoksiin, että sisälämpötila laskee liikaa ennen säteilyn alkua jos ennakko on liian suuri, jopa 1h oli joissakin tilanteissa liian pitkä. Ongelmia ilmenee myös, jos säteilyn lämmitysvaikutus on liian vähäinen eikä riitä lämmittämään rakennusta. Sisälämpötila laskee tällöin liian alas. Kevyt rakennus on paljon herkempi muutoksille. Ennakoinnilla saavutettu hyöty on kevyessä rakennuksessa vähäinen.

Useat kaupalliset säätölaitteet käyttävät ennakointia suoralla säädettäessä niin, että laskevat säätökäyrää, eli tekevät yhdensuuntaissiirtoa ennen tulevaa muutosta.

### 10.3 Tilakonesäätö

Tilakonesäätö ohjaa menoveden lämpötilaa nykyisten tulotietojen ja edellisten lähtötietojen muodostamien kombinaatioiden, so. tilojen mukaan. Malliin on mahdollista antaa tulotietoina ulkolämpötila-, säteily- ja muita häiriötietoja. Jos tiettyä häiriötä ei varsinaisesti lisätä, malli kuitenkin ottaa sen huomioon huomaamalla, että rakennus toimii eri tavoin samoissa

sisääntulojenkombinaatioissa. Malli oppii ja laskee keskiarvon, jos se kohtaa saman kombinaation ja näin huomioonottamattomien häiriöiden vaikutus pienenee. Aluksi on tutkittu mallin toimintaa ilman säteilytietojen huomioonottamista.

### **10.3.1 Ilman säteilyn huomioonottamista**

Jos säteilyä ei lisätä ollenkaan malliin, niin optimi säätösuoralla parannus on minimaalinen. Ongelmana on mittaustietojen vähyys, joten malli ei ehdi parantaa itseään. Aineistosta laskettiin sisälämpötilojen residuaaleja, jotta nähtäisiin erot graafista kuvaa paremmin. Residuaalissa lasketaan yhteen sisälämpötilan erotus asetusarvosta jokaisella aika-askeleella. Laskelmat on tehty sekä kevyellä että raskaalla rakennuksella.

Asetusarvo: 20 °C

TPkerr: 5

Tallaika: 1000 h

Suora:  $-0,5x+30$

Aikaväli: 1000 h-2000 h

Aika-askel: 0,25 h

#### ***Kevyt rakennus***

---

Sisälämpötilan residuaali perinteinen säätötapa:  
3282

Sisälämpötilan residuaali tilakonesäätö:  
3305

Residuaalit ovat lähes yhtä suuret. Tämä tarkoittaa lähes yhtä suurta vaihtelua sisälämpötiloissa. Tilakonesäädöllä ei siis pystytä parantamaan tilannetta, jos säteilyä ei lainkaan huomioida.

#### ***Raskas rakennus:***

---

Sisälämpötilan residuaali perinteinen säätötapa:  
1837

Sisälämpötilan residuaali tilakonesäätö:  
1477

Raskaalla rakennuksella tilakonesäätö näyttäisi toimivan hieman paremmin. Tämä johtuu massiivisen rakennuksen ominaisuudesta hidastaa lämpötilan vaihteluita ja näin tilakonesäätö pysyy nopeissa säteilyn muutoksissa paremmin mukana.

Energian kulutus voidaan laskea summaamalla jokaisen aika-askeleen tehoarvo. Aika-askel on 15 min, joten jakamalla summa neljällä saadaan energiankulutus. Ajanjakson pituus on 1000 h.



Suoralla säädettäessä summa on  $2,37 \cdot 10^7$  kJ/h. Eli jaetaan neljällä niin saadaan kokonaiskulutus 5900000 kJ

Summa mallilla säädettäessä on  $2,32 \cdot 10^7$  kJ/h. Kun jaetaan neljällä, saadaan vastaavaksi arvoksi 5800000 kJ

Ja eroksi näille arvoilla saadaan

$$\frac{5,9 \cdot 10^6 - 5,8 \cdot 10^6}{5,9 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 1,7\%$$

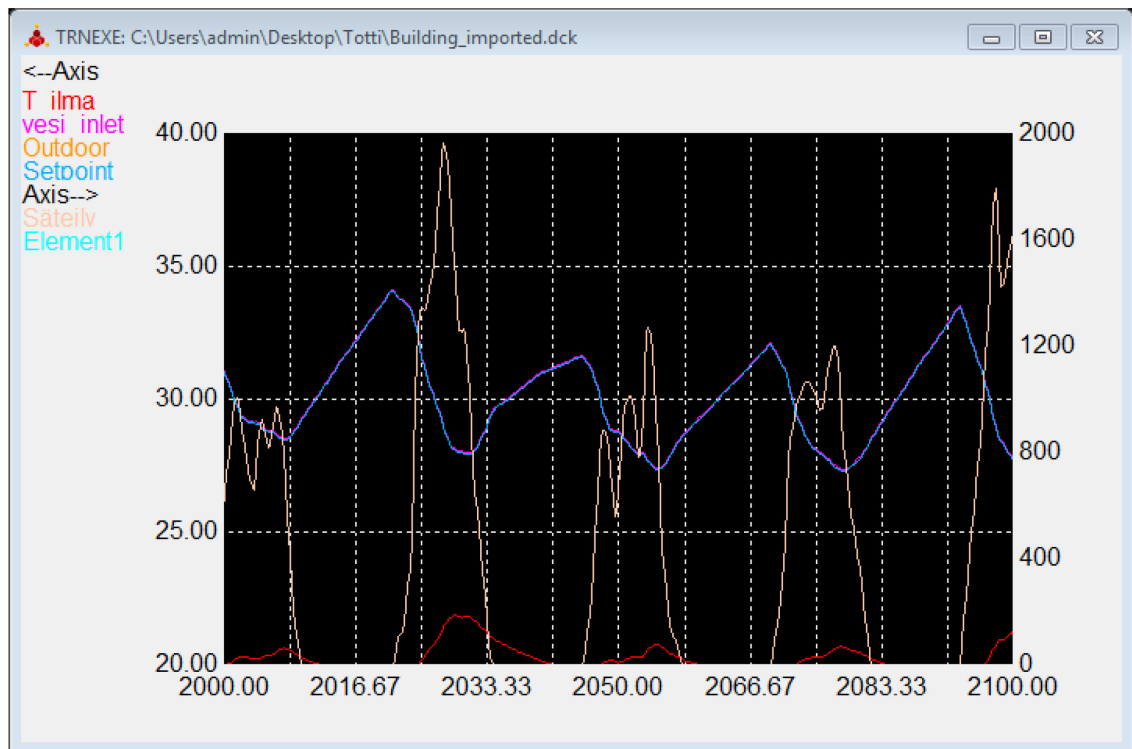
Ero on pieni, mutta silti selvä. Tilakonesäätö toimii paremmin kuin perinteinen säätötapa. Energian kulutuslaskelmat ovat vain suuntaa-antavia, sillä todellisen tilanteen termostaattijärjestelmä puuttuu simulointijärjestelmästä kokonaan. Termostaatit estäisivät sisälämpötilan nousua kuristamalla nesteen kiertoa. Termostaatit on jätetty pois, koska tarkoitus on tutkia menoveden lämpötilan säätöä ja termostaatit sekoittavat menoveden lämpötilan tutkimista paljon.

Huonolla säätösuoralla tilakonesäätö toimii kuten ilman säteilyä ja parantaa sisäilman keskiarvoa lähemmäs asetusarvoa. Joissakin tilanteissa vaihteluväli hieman kasvaa. Tilakonesäädön mahdollisuudet parantaa säätösuoraa, jos siinä on virheitä, on hyvät, vaikka tilanteessa olisikin häiriöitä.

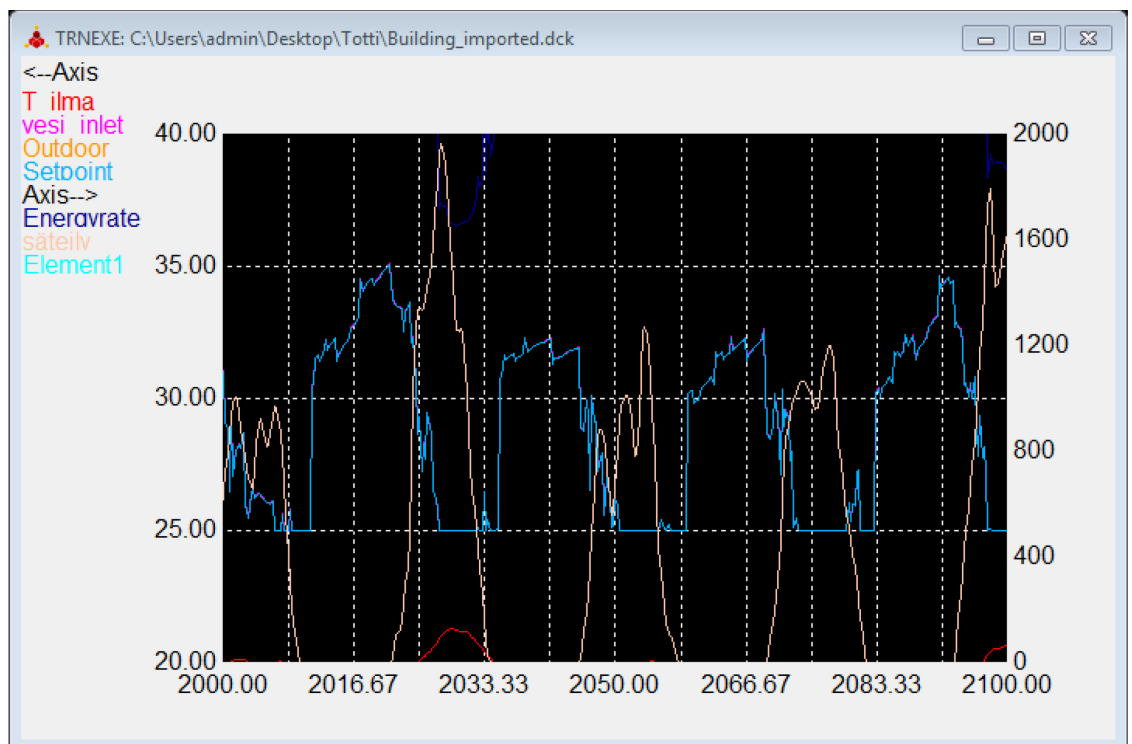
### 10.3.2 Säteily otettu huomioon

Häiriöt ovat luonteeltaan erilaisia. Säteily on luonteeltaan hyvin erilainen häiriö kuin ulkolämpötila. Säteily on hyvin voimakas ja kertaluonteinen toisin kuin ulkolämpötila, jonka muutokset ovat suhteellisen hitaita ja pysyviä. Säteilyn siirtäminen malliin on vaikeaa juuri säteilyn luonteen vuoksi.

Tilakoneeseen perustuva säätötapa saatiin toimivaksi niin, että malliin luotiin kaksi eri taulukkoa, toiseen taulukkoon tallennetaan ulkolämpötilakombinaatioita ja toiseen tallennetaan säteilykombinaatioita. Ulkolämpötilataulukkoa käytetään, kun säteilyn arvo ei ylitä tiettyä raja-arvoa. Säteilykombinaatiotaulukkoa käytetään kun säteilyn arvo ylittää raja-arvon. Ohjelmassa käytetään kahta eri kerrointa: toisen avulla korjataan menoveden lämpötilaa sisälämpötilan avulla kun ulkolämpötilakombinaatiotaulukko on käytössä ja toista kerrointa käytetään korjaamaan menoveden lämpötilaa sisälämpötilan avulla kun säteilykombinaatiotaulukko on käytössä.



Kuva 36 kevyt rakennus perinteinen säätötapa suoralla  $T_m = -0,5T_u + 30$



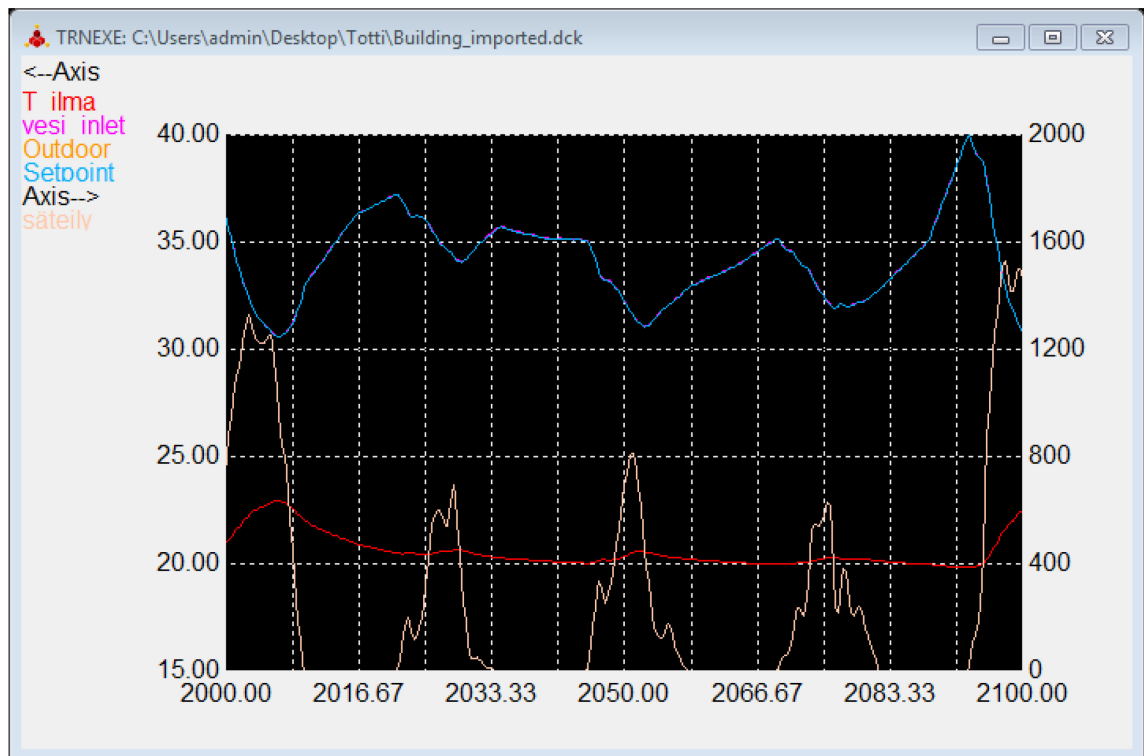
Kuva 37 Tilakonesäätö

Kuvissa 36 ja 37 on esitetty säteilyn arvot ( $\text{kJ}/(\text{hr}\cdot\text{m}^2)$ ), menoveden lämpötilan arvot ( $^{\circ}\text{C}$ ) ja yli  $20^{\circ}\text{C}$  ylittävät sisälämpötila-arvot aikavälillä 2000-2100 h. Kuvista 36 ja 37 näkee perinteisen ja tilakoneeseen perustuvan säädön erot menoveden lämpötiloissa. Suoralla säädettäessä lämmitystehoa lasketaan säteilyn aikana, koska ulkolämpötila nousee auringon säteilyn vaikutuksesta. Lämmitystehon lasku on kuitenkin liian vähäistä ja ajoitus on myöhässä. Tämä johtaa liian korkeisiin sisälämpötiloihin (kuva 36).

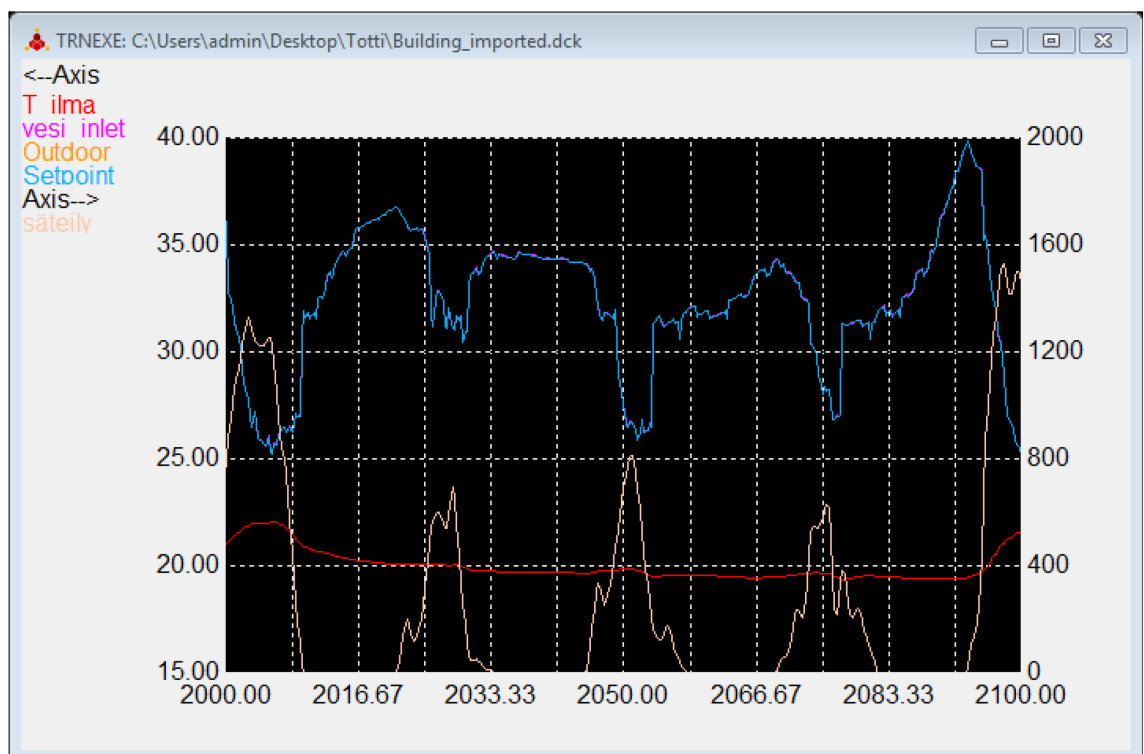
Kuvassa 37 on kuvattu tilakonesäädön toimintaa samalla hetkellä. Menoveden lämpötila putoaa selkeästi säteilyn aikana. Malliin on asetettu menoveden minimilämpötilaksi  $25^{\circ}\text{C}$ . Jos säteilyn vaikutus sisälämpötilaan on suuri, tilakonesäätö ohjaa menoveden lämpötilan minimiarvoon, jotta sisälämpötila ei nousisi yli asetusarvon. Mallin toiminta on hieman sahaavaa, mutta muuten säätö näyttäisi toimivan halutusti. Jostain syystä tilakonesäätö säätää menoveden lämpötilaa korkeammaksi kuin perinteinen säätötapa ennen säteilyn alkamista. Tilakonesäädön avulla sisälämpötilan huippuarvot on saatu pudotettua selvästi matalammiksi. Ainoastaan korkeimman säteilyhuipun kohdalla näkyy selkeä korotus sisälämpötilassa. Säätsuoran avulla säädetyssä tilanteessa lämpötilahuiput näkyvät lähes jokaisen säteilyhuipun kohdalla. Säteilyn liittäminen tilakonesäätöön onnistui lopulta hyvin. Tilakonesäädön huomattiin toimivan paremmin kevyellä kuin massiivisella rakennuksella. Tämä johtuu kevyen rakennuksen selkeämmistä muutoksista. Mallin on helpompi korjata toimintaa, jos muutokset ovat selkeitä.

Säteilyssä tulisi ottaa huomioon vain sellaiset tilanteet, joissa säteilyn lämmitysvaikutus ei ylitä tarvittavaa lämmitystehoa. Sillä kun säteilyn lämmitysvaikutus ylittää tarvittavan lämmitystehon nousee sisäilman lämpötila, vaikka lämmitysteho olisi nolla. Tilanne saadaan luotua valitsemalla ajankohta niin, että säteilyn vaikutus pysyy alhaisena ja rakennuksen lämmitystehon tarve on suuri. Tällöin ajankohta tulisi valita mahdollisimman alkuvuodesta. Tilakonesäätö tarvitsee kuitenkin toimiakseen alkuvuoden tallennusajaksi. Jotta saataisiin ko. tilanne luotua, simulointipaikka pitää valita pohjoisemmasta, jossa auringon säteily on pienempää ja ulkolämpötilat alhaisempia. Sää tiedostoksi valittiin Sodankylän sää tiedosto. Ajankohta on valittu samaksi kuin aikaisemmissa kuvissa.

Kuvat 38 ja 39 kuvaavat simulointia tilanteessa, jossa kevyt puurankainen rakennus sijaitsee Sodankylässä. Simuloinnit on tehty kevyellä laatalla, jonka lämpenemisviive on lyhyt, jotta ennakkoinnin tarve ei olisi niin suuri. Kuvissa on sinisellä menoveden lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ), punaisella sisälämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ) ja keltaisella auringon säteily ( $\text{kJ}/(\text{hr}\cdot\text{m}^2)$ ). Kuvassa 38 menoveden lämpötilaa on säädetty perinteisesti säätsuoran avulla.



Kuva 38 Perinteinen säätötapa suoralla  $T_m = -0,5T_u + 32$  Sodankylä kevyt rakennus



Kuva 39 Tilakonesäätö Sodankylä kerr 2,5 kevyt rakennus

Kuvassa 39 on kuvattu sama tilanne samalla aikavälillä kuin kuvassa 38, erona ainoastaan että menoveden lämpötilaa on säädetään tilakoneeseen perustuvan mallin avulla. Kuvasta 39 huomataan, että säteilyn vaikutus sisälämpötilaan ei nouse liian korkeaksi. Mallille jää tilaa säätää menoveden lämpötilaa. Kuvista on vaikea huomata eroa sisälämpötiloissa eri säätömenetelmillä. Tämän takia sisälämpötiloista on laskettu residuaalit samalta aikaväliltä. Suoralla säädettäessä sisälämpötilan residuaali oli 432,5 ja tilakoneella säädettäessä sisälämpötilan residuaali oli 291,4. Residuaaleissa on selkeä ero. Tilakone siis kykenee parantamaan säätötulosta.

Jos auringon säteilyn rakennusta lämmittävä vaikutus ylittää rakennuksen lämmöntarpeen, ei ole mahdollista estää sisälämpötilan nousua. Sodankylä-säätiedostolla tehdyllä simuloinnilla saatiin luotua tilanne, jossa lämmön tarve pysyy suurempana kuin säteilyn lämmittävä vaikutus. Tämä antaa mallille paremmat mahdollisuudet parantaa säätöä. Tilakonesäätö toimii simuloidussa tilanteessa suunnitellusti ja parantaa säätöä selkeästi.

### **10.3.3 Pelkällä säteilytiedolla ohjaaminen**

Malli toimii yllättävän hyvin pelkän säteilytiedon perusteella, sillä ulkoilmalla on usein yhteys säteilyn arvoon. Ja koska säteilyllä on niin voimakas vaikutus rakennuksen lämmöntarpeeseen. Mallissa päädyttiin ratkaisuun, jossa menoveden lämpötilaa ohjataan pelkän säteilytiedon avulla, kun säteily ylittää tietyn raja-arvon.

### **10.3.4 Ennakointi**

Tilakonesäädössä säteilyn ennakkoinnin idea on sama kuin ennakoidessa ulkolämpötilaa. Tallennetaan säteilyn tulevia arvoja kombinaatioihin ja ohjataan niiden avulla etukäteen lämmitystä oikeaan suuntaa. Jos säteilyä ennakoidaan liian kaukaa, sisälämpötila muuttuu liikaa. Ennakointisimuloinnit on toteutettu kevyellä laadulla, jotta laatan lämpenemisviive ei aiheuta tuloksiin häiriöitä. Paras sisälämpötilan residuaali saatiin 3 tunnin ennakkoinnilla. Ainoastaan säteilytietoa ennakoitiin. Aikavälin 2000-2100 h residuaalit:

1h: 387,2

3h: 381,3

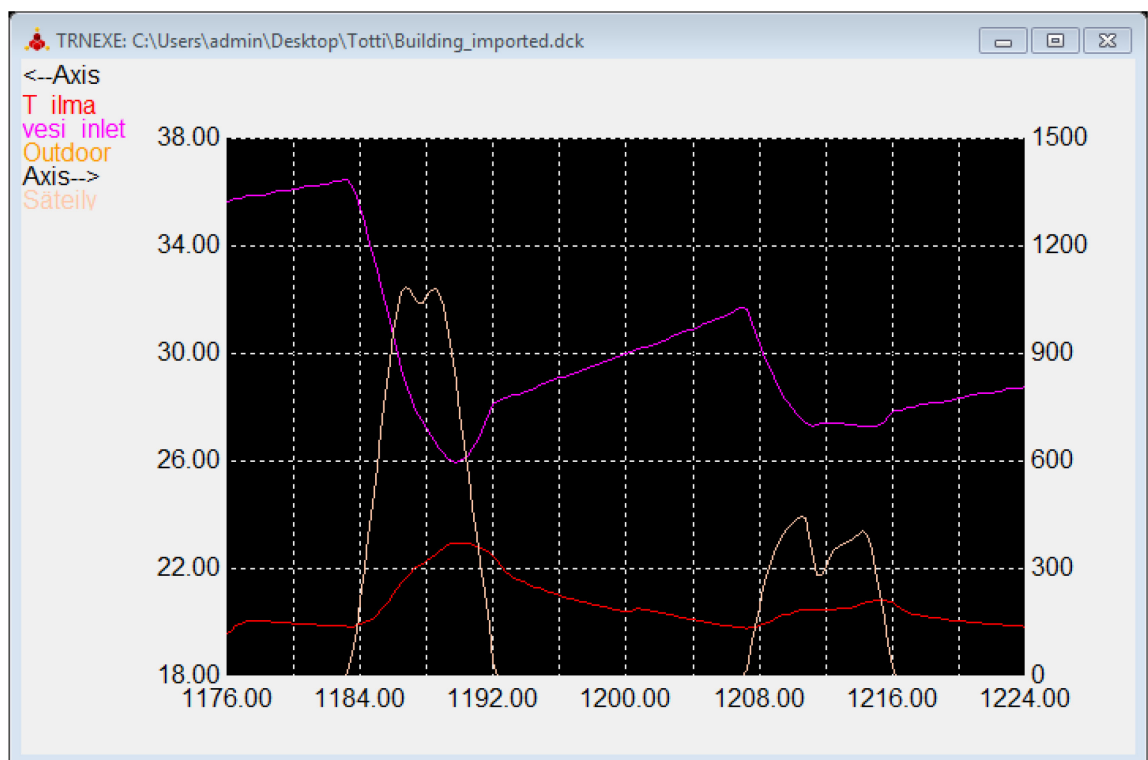
5h: 389,9

Erot residuaaleissa olivat pieniä. Residuaalit olivat selkeästi suurempia verrattuna ilman ennakointia-residuaaliin. Tutkimuksessa ei säteilyn ennakointia tilakonesäädössä saatu toimimaan riittävän hyvin. Tulokset olivat siis säteilyä ennakoitaessa huonompia ennakkoinnilla kuin ilman ennakointia.

## 11 Häiriöt ja säteily

Kun etsitään mahdollisimman todennukaista tilannetta, täytyy ottaa huomioon kaikki mahdolliset muutokset systeemissä: ulkoilma, auringonsäteily, ilmanvaihto, valaistus, laitteet ja ihmiset. Tilakoneeseen perustuva säätö saa tulotietoina auringon säteily- ja ulkoilmatiedot ja käyttää sisäilman lämpötilatietoa korjataksaan menoveden lämpötilaa.

Häiriöt näyttäisivät vaikuttavan sisäilman lämpötilaan melko paljon. Lämpötila on korkeimmillaan päivällä, kun rakennuksen sisäilmaan vaikuttavat säteilyn lisäksi valaistus, ihmiset ja koneet. Ilmanvaihto on suurimmillaan päivällä, mutta sen viilentävä vaikutus ei ole riittävä kompensoimaan lämpökuormien vaikutusta. (Kuva 40)



**Kuva 40 Häiriöt ja säteily perinteinen säätö**

Kuvassa 40 lämmitysteho on riippuvainen ainoastaan ulkoilman lämpötilasta suoran  $T_m = -0,7T_u + 27$  mukaan. Se ei siis ota häiriöitä tai auringon säteilyä huomioon millään tavalla. Se vähentää lämmitystehoa säteilyn alkaessa, koska ulkoilman lämpötila nousee auringon vaikutuksesta. Kuvassa 40 on esitetty auringon säteily sekä sisäilman ja lämmitysveden lämpötila kahtena peräkkäisinä päivinä.

Lämpötila lähtee nousuun kun valaistus lähtee päälle ja auringon säteily lisääntyy. Illalla säteily kääntyy laskuun ja valaistus ja koneet menevät pois päältä, näin ollen sisäilman lämpötila laskee. Kuvan 40 mukaan säteilyllä on hallitseva suhde sisäilman lämpötilaan.

Tilakonemalli käyttää kahta eri taulukkoa, johon se tallentaa kombinaatioita. Malli ohjaa menoveden lämpötilaa ulkolämpötilatietojen avulla kun säteilyä ei ole ja säteilytietojen avulla kun säteily on riittävän suurta. Tähän päädyttiin, koska auringon säteilyn vaikutus sisäilman lämpötilaan on niin hallitseva. Ulkolämpötila vaikuttaa rakennuksen lämmitystehon tarpeeseen kuitenkin voimakkaasti, vaikka auringon säteily lämmittääkin rakennusta. Ongelmana ovat siis tilanteet, jotka säteilyarvon perusteella näyttävät samanlaisilta, vaikka ulkoilman lämpötilan arvoissa saattaa olla suuria eroja.

Muut häiriöt malli huomioi ainoastaan keräämällä ulkolämpötilan, säteilyn ja sisäilman lämpötilojen kombinaatioita ja laskemalla samanlaisten kombinaatioiden sisäilman keskiarvon ja tekemällä korjauksen keskiarvon mukaan, jolloin häiriötilanteita tulee erilaisia ja niiden vaikutuksen pitäisi vähentyä. Tämä vaatii paljon mittaustuloksia, jotta malli saa riittävästi tietoa eri häiriötilanteista. Tämän seurauksena tallennusaika on valittu mahdollisimman pitkäksi ja prediktointivaihe toteutettu vuoden loppupuolella.

Seuraavassa simuloititilanteessa käytetään kevytrakenteista rakennusta, johon on lisätty samat häiriöt kuin Häiriöt-kappaleessa on lueteltu ja tilakonesäätökomponentti ottaa tulotietona ulkoilman lämpötilan ja säteilytiedon.

Aikaväli 7300-7500 h ajoittuu marraskuulle. Tilakonemallin aikaansaamat muutokset lattialämmitysveteen ovat merkittävät. Graafisesti on vaikea huomata eroja sisälämpötilassa. Residuaalin avulla saadaan erot sisälämpötiloissa selkeämmin esille. Residuaalissa lasketaan sisälämpötilan ja asetusarvon erotukset yhteen jokaisella aika-askeleella.

Sisälämpötilan residuaali tilakonesäätö: 603,5

Sisälämpötilan residuaali perinteinen säätötapa: 920,5

Ero residuaaleissa on selkeä. Aika-askel tilanteessa oli 0,25 h ja aikaväli 200 h. Erotus  $920 - 603 = 317$  vastaa siis n. 0,4 celsiusasteen eroa per aika-askel. Tilakonesäätö pitää sisälämpötilan lähempänä asetusarvoa. Viihtyisyyden kannalta näin pienet erot eivät ole merkittäviä, mutta energiankulutuksessa eroja syntyy. Tämä johtuu tilakonesäädön kyvystä säätää lämmitysteho pienemmälle, kun lämmitystä ei tarvita. Tämä myös lisää termostaattien säädettävyyttä.

Energiankulutus on laskettu lattialämmityskomponentilta saaduista lähtötiedoista. Komponentilta saa lähtötietona kokonaistehon, jonka lämmitysvesi on luovuttanut ja tehon, joka on siirtynyt simuloitavaan tilaan. Energian saa laskettua tehoarvoista (kJ/h). Kun laskee

arvot yhteen ja jakaa aika-askelien määrällä per tunti saa kokonaisenergiankulutuksen (kJ) aikavälillä.

Alla laskelmat energiankulutuksesta ja vertailut:

#### ***Tilakonesäätö:***

---

Summat:

Tilaan siirtyvä  $1,94 * 10^6$  (kJ/hr)

Luovutettu  $2,54 * 10^6$  (kJ/hr)

Energia:

Tilaan siirtyvä  $4,85 * 10^5$  kJ \* 1/3600 kWh/kJ = 134,72 kWh

Kokonaisenergia  $6,35 * 10^5$  kJ \* 1/3600 kWh/kJ = 176,39 kWh

Keskimääräinen teho:

Tilaan siirtyvä 134,72 kWh / 200 h = 0,674 kW

Kokonaisteho 176,39 kWh / 200 h = 0,882 kW

#### ***Perinteinen säätö:***

---

Summat:

Tilaan siirtyvä  $2,05 * 10^6$  kJ/hr

Luovutettu  $2,85 * 10^6$  kJ/hr

Energia:

Tilaan siirtyvä  $5,13 * 10^5$  kJ \* 1/3600 kWh/kJ = 142,36 kWh

Kokonaisenergia  $7,13 * 10^5$  kJ \* 1/3600 kWh/kJ = 197,92 kWh

Keskimääräinen teho:

Tilaan siirtyvä 142,36 kWh / 200h = 0,712 kW

Kokonaisteho 197,92 kWh / 200h = 0,999 kW

#### ***Vertailu:***

---

Energia:

Tilaan siirtyvä (134,72-142,36) kWh / 142,36 kWh \* 100 % = -5,4 %

Kokonaisenergia (176,39-197,92) kWh / 197,92 kWh \* 100 % = -10,9 %

Keskimääräinen teho:

Tilaan siirtyvä 0,712 kW - 0,674 kW = 0,038 kW

Kokonaisteho 0,999 kW - 0,882 kW = 0,117 kW



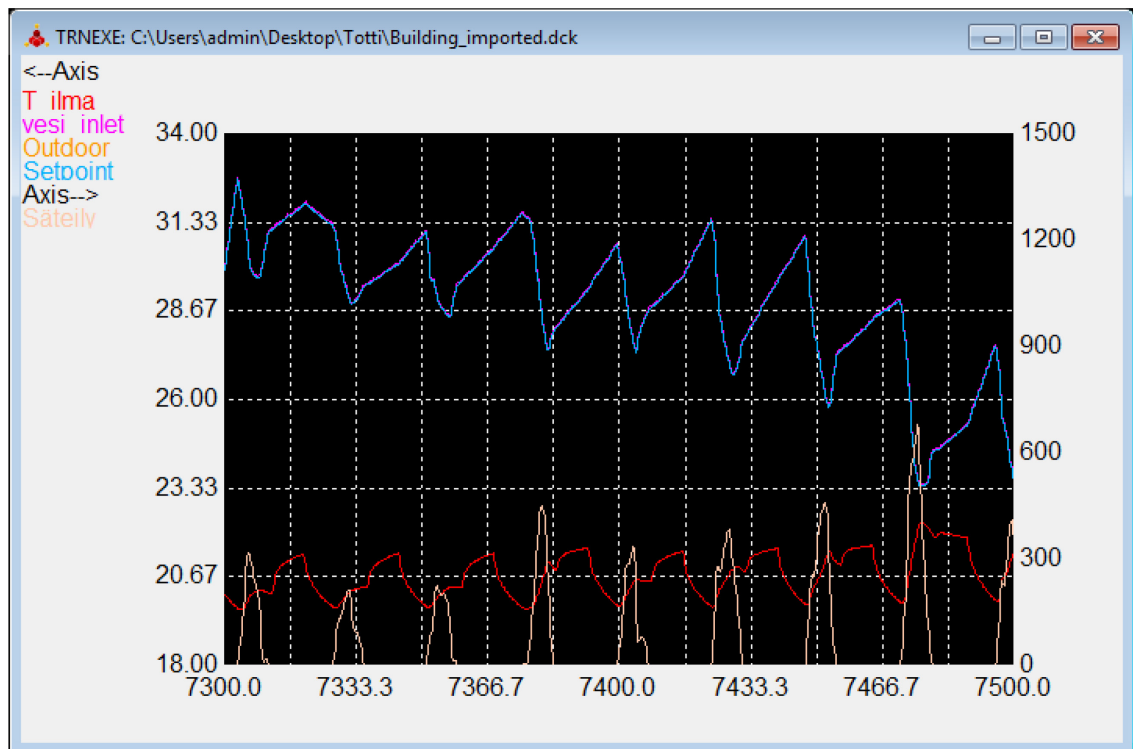
Vertailuosuudessa on laskettu energiamäärän muutos, jos oletetaan että käytössä on alun perin ollut perinteinen säätömenetelmä ja siirrytään tilakoneeseen perustuvaan ohjausmenetelmään.

Tilanne ei ole todellinen, sillä huonetermostaatit puuttuvat. Termostaatit sulkisivat syötön lämpötilan noustessa yli termostaattiin asetetun arvon. Energialaskelmat selventävät silti tehostuksen vaikutusta. Oikeampi lämmitysveden lämpötila parantaa termostaattien toimintaa. Ääritilanteissa, kun termostaatit toimivat rajojensa läheisyydessä niiden säätö mahdollisuudet ovat vähäiset. Oikea lämmitysveden lämpötila antaa termostaateille liikkumavaraa. Väärin valittu menoveden lämpötila on myös energiankulutusta lisäävä tekijä.

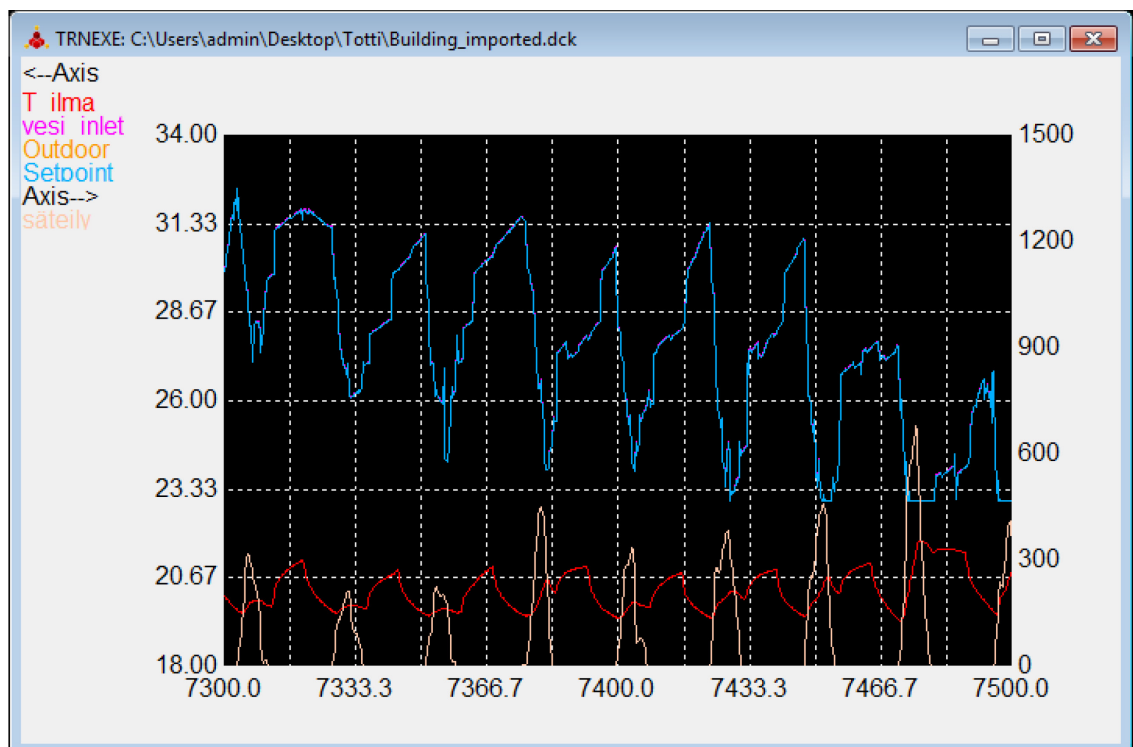
Kuvaparissa (kuvat 41 ja 42) on kuvattu lämmitysveden lämpötilojen eroja ohjattaessa suoran tai tilakonesäädön avulla. Kuvista huomaa kuinka tilakonesäädön avulla säädettäessä menoveden lämpötila laskee reilusti säteilyn aikana pitäen kuitenkin sisälämpötilan paremmin tasaisena, kuten aikaisemmin lasketuista residuaaleista huomattiin. Kuvisa on vasemmalla akselilla lämmitysveden lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ) ja sisälämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ) ja oikealla akselilla on auringon säteily ( $\text{kJ}/(\text{hr}\cdot\text{m}^2)$ ). Aikaväli on sama kuin aikaisemmissa residuaalilaskuissa.

Kuvaparista (kuvat 41 ja 42) huomataan kuinka reilusti menoveden lämpötilaa voidaan laskea auringon säteilyn aikana, pitäen sisälämpötila kuitenkin oikeana. Lämmityshuiput ovat lähes yhtä korkeat. Tilanteiden energiankulutuserot ovat suuret, kuten aikaisimmasta laskelmista näkee. Kuvat tukevat laskelmia hyvin. Menoveden lämpötilan keskiarvo on huomattavasti alhaisempi tilakoneeseen perustuvalla lämpödynaamisella mallilla säädetyssä tilanteessa kuin suoralla säädettäessä.

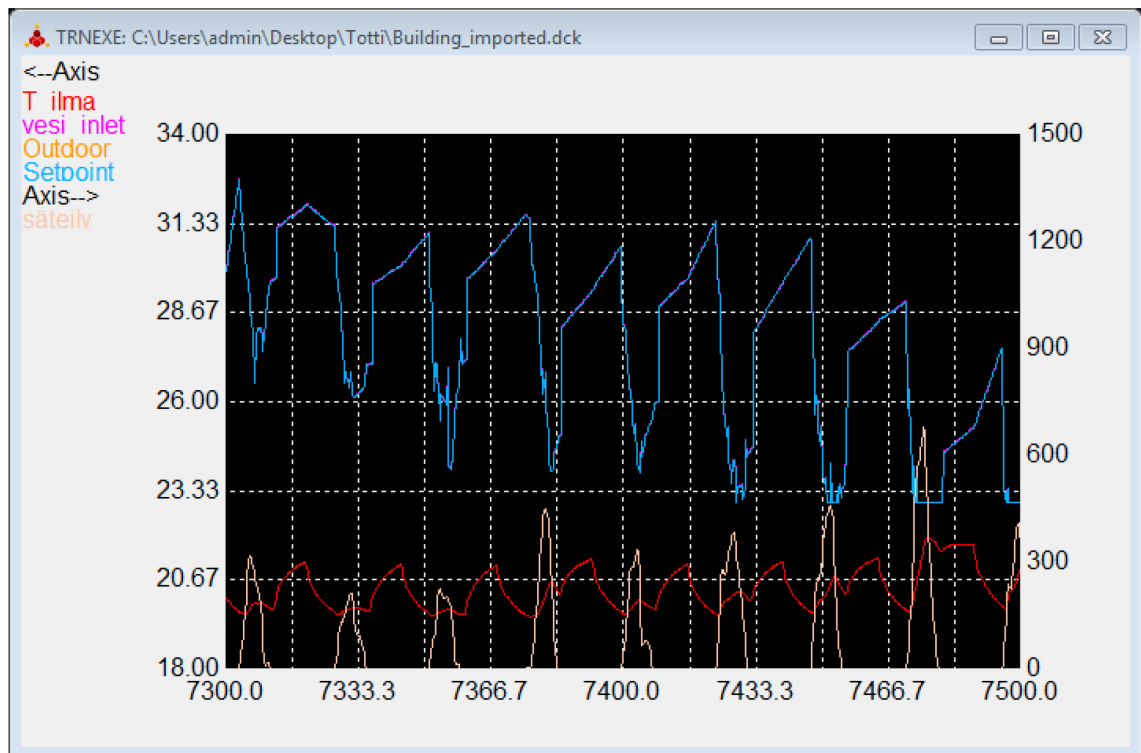
Kuvista 41 ja 42 huomaa kuinka suuria lämmitysveden lämpötilan muutokset ovat toimivassa säätötilanteessa. Suoralla säädettäessä muutokset ovat pienempiä. Tilakonesäätö käyttäytyy eri tavalla myös kun säteily on nolla. Säätö pyrkii tasoittamaan sisälämpötilan huippuarvoja.



Kuva 41 Perinteinen säätötapa suoralla  $T_m = -0,5T_u + 28$



Kuva 42 Tilakonesäätö



**Kuva 43 Tilakonesäätö edellisten arvojen kvantisointitasojen lukumäärä 3**

Yllä oleva kuva (kuva 43) on samasta tilanteesta kuin kuvat 41 ja 42. Säädön toimintaa muutettiin ainoastaan vaihtamalla kvantisointitasojen lukumäärää. Kvantisointitasojen lukumäärää pienennettiin, koska huomattiin edeltävien arvojen tarvitsevan vähemmän kvantisointitasoja. Säädessä tapahtui selvää paranemista kun taulukon kokoa pienennettiin vaihtamalla edellisten arvojen kvantisointitasojen lukumäärä kolmeen. Tilakonesäätö kykenee paremmin huomioimaan häiriöt, koska samoja kombinaatioita tulee enemmän ja dynaaminen malli saa enemmän tietoa systeemin käyttäytymisestä. Muutoksella tilakonesäätö saatiin toimimaan selkeämmin ja varmemmin.

## 12 Pohdinta

### 12.1 Tilakonemalliin perustuva säätö

Tilakoneeseen perustuva lämpödynaaminen malli toimii lattialämmityksen säädön parantamisessa hyvin, jos alkuperäinen säätösuora ei ole kohdallaan. Tilakoneeseen perustuva menetelmä pystyy ohjaamaan menoveden lämpötilaa niin, että sisälämpötila pysyy paremmin asetusarvossaan. Tämä ominaisuus on tarpeen käytännön tilanteessa, koska rakennusten lämmitysautomaatiikan säätökäyrissä on lähes aina parannettavaa.

Auringon säteilyllä huomattiin olevan suuri vaikutus rakennuksen lämmitykseen. Jos säteilyä ei oteta ollenkaan huomioon, tulee paljon tilanteita, jolloin yllilämmitetään. Säteilytiedon siirtäminen malliin toteutettiin niin, että mallissa on kaksi erillistä tilakonetta, jotka säätävät menoveden lämpötilaa. Kun säteilyn arvo ylittää tietyn rajan, tilakoneeseen perustuva säätö säätää ainoastaan säteilytiedon avulla ja muulloin ulkolämpötilatiedon avulla. Tilakonesäätö kykenee ottamaan auringon säteilyn huomioon hyvin säädettäessä menoveden lämpötilaa. Yllilämmitystilanteet vähenivät selkeästi ja säätö tuli paremmaksi. Ongelma tilakonesäädön toiminnassa säteilyn aikana oli säteilyn suuri lämmitysteho. Säteily oli usein niin voimakasta, että sen lämmittävä vaikutus ylitti rakennuksen lämmitystarpeen. Säteilyn huomioon ottaminen on vaikeaa sen nopeuden ja voimakkuuden takia. Säteilyn ennakointia tilakoneeseen perustuvalla menetelmällä ei tässä tutkimuksessa saatu toimimaan riittävän hyvin.

Ilmanvaihdon ja valaistuksella on suuri vaikutus rakennuksen lämmitystarpeeseen. Näiden häiriöiden lisääminen malliin todennäköisesti parantaisi tilakonesäädön toimintaa todellisessa tilanteessa. Ongelmana on tulotietojen lisääntyessä tarvittavan muistikapasiteetin kasvaminen.

Jos häiriöt eivät ole komponentin tulotietona, tilakonesäädön avulla säädettäessä ei huomattu parannusta perinteiseen säätötapaan verrattuna. Tämä voi johtua liian lyhyistä tallennusajoista, sillä tilakonemallin mahdollisuudet parantaa säätöä ko. tilanteessa perustuu mallin oppimiskykyyn aikaisemmista samanlaisista tilanteista.

Kokonaisuudessaan tilakonesäätö pystyy parantamaan säätöä ja vähentämään energiankulutusta rakennuksen lämmityksessä. Sisälämpötilojen residuaalit olivat alhaisempia ja näin myös energiankulutus oli pienempää säädettäessä tilakoneeseen perustuvan säätömenetelmän avulla verrattuna perinteiseen säätötapaan.

## 12.2 Ennakointi

Tutkimuksessa havaittiin, että ohjauksen ennakointi massiivisella laatalla on järkevää, jos muutos ulkolämpötilassa on riittävän pitkäkestoinen. Tämä johtuu siitä, että laatan lämpenemisessä on viive, jonka vuoksi lämmitys jää jälkeen, jos ennakointia ei tehdä.

Ennakoinnista voi myös olla haittaa, jos muutokset ovat nopeita ja järjestelmä alkaa ennakoida edessä olevaa tilannetta, vaikka edellinen tilanne on vielä kesken. Tällöin sisälämpötilan vaihteluväli kasvaa ja energiankulutus lisääntyy. Ennakoinnista on haittaa myös, jos ennakointiaika on liian pitkä. Tällöin sisäilman lämpötila muuttuu liikaa. Jos ennakointiaika on liian lyhyt, ei ennakoinnista saada haluttua hyötyä irti.

Tutkimuksessa tehtyjen simulointien mukaan optimaalinen ennakointiaika simuloidulla massiivisella rakennuksella on tilanteesta riippuen 3h-5h. Viidellä tunnilla sisälämpötila palautuu nopeasti ulkolämpötilan muuttuessa takaisin asetusarvoon, mutta kolme tuntia vaikuttaisi toimivan parhaiten todellisessa tilanteessa. Kolmella tunnilla ennakointi jää vähän vajaaksi ja antaa näin enemmän mahdollisuuksia huomioida nopeat muutokset ulkolämpötilassa.

Ennakointi vaikuttaisi toimivan massiivisella laatalla kohtuullisen hyvin todellisella ulkolämpötilatiedostolla. Muutokset näyttäivät olevan ulkolämpötiloissa pääosin riittävän hitaita eikä ulkolämpötila sahaa useinkaan edestakaisin. Tutkimuksessa luotua tilannetta, jossa ulkolämpötila tekee nopean edestakaisen liikkeen, ei näyttäisi simulointiohjelman luomien säätiedostojen mukaan tulevan usein. Tämä antaa ennakoinnille mahdollisuudet toimia todellisessa tilanteessa. Rakennuksen sisälämpötilan vaihtelut saatiin ennakoinnilla pidettyä pienempinä kuin jos ennakointia ei käytetty.

Myös säteilyn vaikutusta pyrittiin ennakoimaan. Tavoitteena oli viilentää rakennusta ennen säteilyn alkua, jotta rakennuksella olisi puskuria ottaa vastaan säteilyn lämpökuorma. Tutkittaessa käytettiin absoluuttisen oikeaa ennustetta. Säteilyn ennustus todellisessa tilanteessa on vaikeaa, sillä pilvet ja muut häiriötekijät muuttavat säteilyn tehoa voimakkaasti ja nopeasti. Säteilyn ennakoinnilla huomattiin olevan positiivinen vaikutus sisäilman lämpötilan pysyvyyteen massiivisella rakennuksella, jos tiedetään tarkalleen milloin säteily alkaa.

Tutkimuksessa ennakointi tapahtui niin että lämmitysteho nostettiin samaan kuin mikä se säätömenetelmän mukaan olisi ennakointiajan päästä. Ennakointia voi myös säätää monella muulla tavalla. Ennakointi voisi liittyä laatan lämpötilaan. Ennakoitaisiin niin, että ehdittäisiin

nostaa laatan lämpötila halutuksi ja seurattaisiin vain että laatan lämpötila seuraisi haluttuja arvoja. Yritettäisiin siis suoraan päästä eroon laatan aiheuttamasta viiveestä primääritasolla.

### **12.3 Massiivisuus**

Simulointiohjelmassa massiivisen ja kevyen rakennuksen eroja pelkästään seinärakenteita vaihtelemalla on vaikeaa löytää. Suurimmat erot johtuivat lattialämmityksen järjestelmässä toimivan laatan lämpökapasiteetista. Laatan lämpökapasiteettia vaihtelemalla saatiin eroja näkyviin. Suurimmaksi osin tutkimukset on toteutettu kevyellä rakennuksella vaihdellen ainoastaan lattian ominaisuuksia.

Erot johtuivat lattialaatan lämpötilan muutosnopeudesta. Massiivinen laatta lämpenee kevyttä laattaa huomattavasti hitaammin ja reagoi näin hitaammin lämmitystehon muutoksiin. Massiivinen laatta myös sitoo lämpöenergiaa enemmän itseensä kuin kevyt laatta. Kevyen laatan lämmitessä nopeasti, se kykenee paremmin vastaamaan lämmitystarpeen muutoksiin. Yleisesti kevyttä laattaa pidetään lattialämmityksessä parempana vaihtoehtona, juuri sen nopeuden ansiosta. Ennakoinnilla eroja saadaan tasoitettua.

Lämmönsitomiskyvyn ansiosta massiivisella laattalla lämmityspiikit ovat matalampia. Massiivinen laatta tasaa siis lämmityksen tarvetta. Massiivisella laattalla on myös muita hyviä puolia. Massiivinen laatta tasaa säädön virheitä. Lämmitysteho on verrannollinen laatan lämpötilan ja sisäilman lämpötilan erotukseen. Kun kevyt laatta reagoi nopeasti lämmitystehon muutokseen ja lämpenee nopeasti sen lämmitysteho sisäilmaan lisääntyy nopeasti. Jos säätö ei ole täysin kohdallaan, tämä aiheuttaa sisäilman lämpötilaan vaihteluita. Massiivisen laatan lämpötila nousee hitaammin ja lämmitysteho sisäilmaan kasvaa maltillisemmin. Massiivisen laatan pintalämpötilaerot ovat myös pienempiä.

Massiivisen rakennuksen lämpökapasiteetti aiheuttaa lämmöntarpeeseen viivettä. Ulkoilman kylmetessä laatan lämpötilan tulisi nousta hitaasti, sillä massiiviseen rakennukseen on varastoitunut lämpöenergiaa ja ulkoilman lämmitessä laatan lämpötilan tulisi laskea hitaasti, sillä kylmä massiivinen rakennus tarvitsee lämmitäkseen energiaa.

Oikea lämmitysteho kullakin hetkellä riippuu rakennuksen lämmöntarpeesta, johon rakennuksen lämpökapasiteetti vaikuttaa. Raskas laatta mukailee rakennuksen lämmityksen tarvetta paremmin kuin kevyt laatta. Jos säätö ottaa huomioon rakennuksen lämpökapasiteetista aiheutuvat viiveet, on kevyt laatta parempi vaihtoehto, koska se saadaan säädettyä halutuksi ilman ennakointia. Jos rakennuksen lämmöntarpeessa on viivettä, on myös hyvä jos lämmitystehossa on viivettä.

### 13 Yhteenveto

Diplomityössä demonstroitii Pakasen ja Karjalaisen kehittämää tilakonemallia [5] ja siihen perustuvaa säätömenetelmää vesikiertoisen lattialämmityksen ohjauksessa. Työ toteutettiin TRNSYS-simulointiympäristössä. Tilakonemalli installoitiin TRNSYS-simulointiohjelmistoon diplomityössä suunnitellun TYPE-ohjelman avulla. Mallin tulotiedoiksi valittiin ulkolämpötilan ja sisälämpötilan lisäksi auringon säteily. Auringon säteily otettiin huomioon luomalla sille oma tilakone.

Tutkimuksessa havaittiin, että tilakonesäätö toimii hyvin lattialämmityksen ohjauksessa, kun vertailukohteena pidetään perinteistä ulkolämpötilakompensointia säätösuoran avulla. Auringon säteilyllä on suuri vaikutus sisälämpötilaan. Sitä voidaan hallita, jos auringon säteily otetaan huomioon säädössä. Tilakonesäätö kykenee huomioimaan auringon säteilyn ja vähentämään lämmitystä auringon säteilyn aikana. Kun kaikki mahdolliset kuormitukset rakennuksen lämpötaseessa olivat mukana simulointitilanteessa, havaittiin tilakoneen avulla säädettäessä, että sisälämpötilan poikkeamat asetusarvosta olivat pienempiä ja rakennuksen energiankulutus pieneni verrattuna perinteiseen säätötapaan.

Lattialämmityksessä laatta lämpenee viiveellä. Jos sisälämpötila halutaan ohjata asetusarvoonsa halutulla hetkellä, kannattaa lämmityksen ohjauksessa soveltaa sääennustetta. Ennakoidessa ulkolämpötilan muutoksia huomattiin, että jos ulkolämpötilassa tapahtuvien muutosten välinen aika oli suurempi kuin laatan lämpökapasiteetin aiheuttama viive, ennakointi antaa hyviä tuloksia. Jos ulkolämpötilan muutokset olivat suurehkoja, mutta lyhytkestoisia, sääennusteen käytöstä ei ollut merkittävää hyötyä. Parhaaksi ennakoitijaksi simuloitussa rakennuksessa saatiin 3-5h. Ulkolämpötilaennusteen käyttö oli toimiva ratkaisu ainoastaan massiivisella laatalle. Auringonsäteilyn ennustetta voidaan myös hyödyntää lämmityksessä viilentämällä rakennusta ennen säteilyn alkua, jotta rakennuksella on puskuria ottaa auringon lämpö ylikuumentumatta vastaan.

Rakennuksen lämpökapasiteetti aiheuttaa rakennuksen lämmöntarpeeseen viivettä olosuhteiden muuttuessa, mutta myös lämmitysteho muuttuu viiveellä laatan lämpökapasiteetin vuoksi. Laatan lämpökapasiteetti siis tasaa säädön virheitä. Jos säätö ottaa rakennuksen lämpökapasiteetin huomioon, ovat kevyt ratkaisu tai ennakoitu raskas ratkaisu toimivia vaihtoehtoja. Raskas lattialämmitys mukautuu rakennuksen lämmöntarpeeseen, jos lattian lämpemisviive on samaa luokkaa kuin rakennuksen lämmöntarpeen viive olosuhteiden muuttuessa, vaikka säätö ei viivettä huomioisikaan.

## 14 Lähdeluettelo

- [1] Perez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information. Energy build 40 394-8. 2008.
- [2] Heikkinen Marko. Simulointimalli maa- ja aurinkolämpöön perustuvalle lattialämmitysjärjestelmälle. Diplomityö. 2012.
- [3] Mäkinen Janne. Rakennuksen sähkökustannusten pienentäminen maalämpöjärjestelmän kvalitatiivisen ohjauksen avulla. Diplomityö. 2013.
- [4] Afram Abdul, Janabi-Sharifi Farrokh. Theory and applications of HVAC control systems- A review of model predictive control (MPC). Building and environment 18 November. 2013.
- [5] Pakanen Jouko, Karjalainen Sami. A state machine approach in modelling the heating process of a building. Energy and buildings 41 s.528-533. 2009.
- [6] URL:<http://www.TRNSYS.com>
- [7] Seppänen Olli. Rakennusten lämmitys. 2. painos. 2001.
- [8] Dongliang Zhang, Ning Cai, Zijie Wang. Experimental and numerical analysis of lightweight radiant floor heating system. Energy and buildings 61 260-266. 2013.
- [9] Kalema Timo, Keski-opas Jarmo, Mäkelä Hannu ja Roiha Jarmo. Lattialämmityksen hyötysuhde ja lämpödynamiikka. Fortum tutkimusraportteja 01/99. 1999.
- [10] Tomasz Cholewa, Marian Rosinski, Zenon Spik, Marzenna R. Dudzinska, Alicja Siuta-Oлча. On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room. Energy and buildings 66 599-606. 2013.
- [11] Seppänen Olli, Seppänen Matti. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. 1997.
- [12] Jutila Pentti, Eriksson Lasse, Hölttä Vesa. Prosessin identifiointi ja reaaliaikainen säätö. Laboratoriotyöohje Aalto systeemitekniikan laitos. 2003.
- [13] Pajunen Grazyna, Marttinen Arto. Adaptiiviset järjestelmät-identifiointi ja säätö. Teknillinen korkeakoulu säätötekniikan laboratorio SSS julkaisu nro. 12. 1986.
- [14] Posio Jani. Mallipredikatiivinen säätö. Oulun yliopisto säätötekniikan laboratorio raportti B No 39 marraskuu. 2002.
- [15] Laininen Pertti. Tilastollisen analyysin perusteet. 2007.



- [16] Ruusunen Jukka. Tietokonetuettu aikasarja-analyysi. Helsinki University of Technology System analysis laboratory Research reports B6. 1985.
- [17] Haykin Simon. Neural networks a comprehensive foundation. 2. edition. 1999.
- [18] Ghodrat Moghadampour. Genetic algorithms, parameterer control and function optimization: A new Approach. Väitöskirja Acta Wasaensia No. 160. 2006.
- [19] Haltsonen Seppo, Levomäki Jaakko, Rautanen Esko T. Digitaalitekniikka. 4. Painos. 2013.
- [20] Poiksalo Panu-Kristian. Digitaalitekniikan perusteet Aloitusopas digitaalisen maailman rakentajille. 3.laitos 1.painos. 2007.
- [21] Haikala Ilkka, Märijärvi Jukka. Ohjelmistotuotanto. 10. painos. 2004.
- [22] Comer david J. Digital logic and state machine design. 2. edition. 1990.
- [23] Illian Janine, Penttinen Antti, Stoyan Helga, Stoyan Dietrich. Statical analysis and modelling of spatial point patterns. 2009.
- [24] TRNSYS manual 05 Multizone building
- [25] TRNSYS manual 07 Programmers guide
- [26] URL:<http://www.meteonorm.com>
- [27] TRNSYS manual 08 Weather data
- [28] TRNSYS manual 03 Standard component library overwiev
- [29] TRNSYS manual 04 Component mathematical reference
- [30] TRNSYS Type653 pdf
- [31] URL:<http://www.danfoss.com>
- [32] URL:<http://www.ilmatieteenlaitos.fi>

## 15 Liitteet

### 15.1 Liite A TYPE 277 Fortran koodi

```
Subroutine Type277
! Object: Controller
! Simulation Studio Model: Type277
! Author: Totti Tuutti
! Editor:
! Date: September 16, 2013
! last modified: September 16, 2013
! *** Model Parameters
!
! PARAMETRI1 - [-Inf;+Inf]
! PARAMETRI2 - [-Inf;+Inf]
! *** Model Inputs
!
! TULKO C [-Inf;+Inf]
! VENTIL - [-Inf;+Inf]
! SOLRAD - [-Inf;+Inf]
! SOLPWR - [-Inf;+Inf]
! TROOM - [-Inf;+Inf]
! *** Model Outputs
!
! TPMENO - [-Inf;+Inf]
! *** Model Derivatives
! (Comments and routine interface generated by TRNSYS Studio)
! *****
!-----
! This TRNSYS component skeleton was generated from the TRNSYS studio
! based on the user-supplied parameters, inputs,
! outputs, and derivatives. The user should check the component
! formulation carefully and add the content to transform
! the parameters, inputs and derivatives into outputs. Remember,
! outputs should be the average value over the timestep
! and not the value at the end of the timestep; although in many
! models these are exactly the same values. Refer to
! existing types for examples of using advanced features inside the
! model (Formats, Labels etc.)
!-----
!
! Use TrnsysConstants
! Use TrnsysFunctions
! INCLUDE '\trnwin\kernal\param.inc'
!-----
!DEC$Attributes DllExport :: Type277
!-----
!Trnsys Declarations
!Implicit None
!Double Precision Timestep,Time
!Integer CurrentUnit,CurrentType
!DIMENSION XIN(5),OUT(1),PAR(2),INFO(15)
!DOUBLE PRECISION XIN,OUT,PAR
!INTEGER*4 INFO
!INTEGER*4 NI,NO,NP,ND
!INTEGER KX(8,0:20),KY(0:20)
!DIMENSION TAU(0:130000),TAS(0:130000)
!DIMENSION P(0:20),Y(0:20),X(8,0:20)
!DOUBLE PRECISION TAU,TAS,P,Y,X
!DOUBLE PRECISION R,XMIN(5),YMIN(1),XMAX(5),YMAX(1)
!DOUBLE PRECISION QUSTEP(0:5),YEMAX,TMP,TMP1,TMP2
!DOUBLE PRECISION TALLAIKA,PREDAIKA,TASE,TKERR,SKERR
!INTEGER J,II,OS,OS1,EDOSU,EDOSS,IM
!INTEGER JE,J1,J2,J3,J4,NN,NOL,M,IJ
```

```

    INTEGER SWITCH
    INTEGER N(10),NS(10),MAXOSO
    COMMON/ALUE1/N,NS,MAXOSO

C
    CHARACTER (Len=MaxMessageLength) Message1
    CHARACTER (Len=MaxMessageLength) Message2
    CHARACTER (Len=MaxMessageLength) Message3
    CHARACTER (Len=MaxMessageLength) Message4

C
!   PARAMETERS
    DOUBLE PRECISION PARAMETRI1
    DOUBLE PRECISION PARAMETRI2

C
!   INPUTS
    DOUBLE PRECISION TULKO
    DOUBLE PRECISION ETULKO
    DOUBLE PRECISION SOLRAD
    DOUBLE PRECISION ESOLRA
    DOUBLE PRECISION TROOM

!   OUTPUTS
    DOUBLE PRECISION TPMENO
    DOUBLE PRECISION TPMENA

C
!   ALUSTUS
    DATA YMIN/20.0/
    DATA YMAX/48.0/

    DATA XMIN/-26.0,0.0,0.0,0.0,10.0/
    DATA XMAX/9.0,1.0,1500,1500,25.0/
    DATA YEMAX/10/
    DATA QUSTEP/0.622,0.729,1.0,80.0,1.0,1.0/
    DATA N/50,8,48,6,0,0,0,0,0,0/
    DATA NS/50,8,20,10,0,0,0,0,0,0/
    DATA MAXOSO/130000/
    DATA SWITCH/0/
    DATA TALLAIKA/2000/
    DATA PREDAIKA/200/
    DATA TASE/20.0/
    DATA NP/0/
    DATA NI/5/
    DATA NO/1/
    DATA ND/0/
    DATA R/0.0/

!-----
!Get the Global Trnsys Simulation Variables
    Time=getSimulationTime()
    Timestep=getSimulationTimeStep()
    CurrentUnit = getCurrentUnit()
    CurrentType = getCurrentType()

!-----
!-----
!Set the Version Number for This Type
    If(getIsVersionSigningTime()) Then
        Call SetTypeVersion(17)
        Return
    EndIf

!-----
!Do Any Last Call Manipulations Here
    If(getIsLastCallofSimulation()) Then
        Return
    EndIf

```

```

!-----
!Perform Any "After Convergence" Manipulations That May Be Required at
the End of Each Timestep
    If(getIsConvergenceReached()) Then
        Return
    EndIf
!-----
!Do All of the "Very First Call of the Simulation Manipulations" Here
    If(getIsFirstCallofSimulation()) Then
!Tell the TRNSYS Engine How This Type Works
!The number of parameters that the the model wants
        Call SetNumberofParameters(2)
!The number of inputs that the the model wants
        Call SetNumberofInputs(5)
!The number of derivatives that the the model wants
        Call SetNumberofDerivatives(0)
!The number of outputs that the the model produces
        Call SetNumberofOutputs(1)
!An indicator for the iteration mode (default=1). Refer to section
8.4.3.5 of the documentation for more details.
        Call SetIterationMode(1)
!The number of static variables that the model wants stored in the
global storage array and the number of dynamic variables that the
model wants stored in the global storage array
        Call SetNumberStoredVariables(0,0)
!The number of discrete control functions set by this model (a value
greater than zero requires the user to use Solver 1: Powell's method)
        Call SetNumberofDiscreteControls(0)
        Return
    EndIf
!-----
!Do All of the First Timestep Manipulations Here - There Are No
Iterations at the Intial Time
    If (getIsFirstTimestep()) Then
        PARAMETRI1 = getParameterValue(1)
        PARAMETRI2 = getParameterValue(2)

        TULKO = GetInputValue(1)
        ETULKO = GetInputValue(2)
        SOLRAD = GetInputValue(3)
        ESOLRA = GetInputValue(4)
        TROOM = GetInputValue(5)

!Check the Parameters for Problems (#,ErrorType,Text)
!Sample Code: If( PAR1 <= 0.) Call FoundBadParameter(1,'Fatal','The
first parameter provided to this model is not acceptable.')
!Set the Initial Values of the Outputs (#,Value)
        Call SetOutputValue(1, 20) ! TPMENO
!If Needed, Set the Initial Values of the Static Storage Variables
(#,Value)
!Sample Code: SetStaticArrayValue(1,0.d0)
!If Needed, Set the Initial Values of the Dynamic Storage Variables
(#,Value)
!Sample Code: Call SetDynamicArrayValueThisIteration(1,20.d0)
!If Needed, Set the Initial Values of the Discrete Controllers
(#,Value)
!Sample Code for Controller 1 Set to Off: Call
SetDesiredDiscreteControlState(1,0)
        Return
    EndIf
!-----

```

```
!ReRead the Parameters if Another Unit of This Type Has Been Called
Last
```

```
  If(getIsReReadParameters()) Then
    !Read in the Values of the Parameters from the Input File
    PARAMETRI1 = getParameterValue(1)
    PARAMETRI2 = getParameterValue(2)
  EndIf
```

```
!Read the Inputs
```

```
TULKO = GetInputValue(1)
ETULKO = GetInputValue(2)
SOLRAD = GetInputValue(3)
ESOLRA = GetInputValue(4)
TROOM = GetInputValue(5)
```

```
!Check the Inputs for Problems (#,ErrorType,Text)
```

```
!Sample Code: If( IN1 <= 0.) Call FoundBadInput(1,'Fatal','The first
input provided to this model is not acceptable.')
```

```
  If(ErrorFound()) Return
```

```
!-----
!   *** PERFORM ALL THE CALCULATION HERE FOR THIS MODEL. ***
!-----
!
```

```
C *****
C 1) MITTAUSTIETOJEN KÄSITTELY JA TAULUKOINTI
C *****
```

```
Message1='Mittausalueen ylitys, input'
Message2='Virhe osoitteen määrittäksessä'
Message3='Mittausalueen ylitys, output'
Message4='Muistialueen osoite ylitetty'
```

```
IF(SWITCH.EQ.3) THEN
```

```
XIN(1)=ETULKO
XIN(3)=ESOLRA
```

```
ELSE
```

```
XIN(1)=TULKO
XIN(3)=SOLRAD
```

```
ENDIF
```

```
XIN(2)=0
XIN(4)=0
XIN(5)=TROOM
```

```
PAR(1)=PARAMETRI1
PAR(2)=PARAMETRI2
```

```
C
C
```

```
IF(SWITCH.EQ.0) THEN
```

```
  SWITCH = 1
```

```
ENDIF
```

```
C
```

```
IF((SWITCH.EQ.1).OR.(SWITCH.EQ.3)) THEN
```

```
C
```

```
DO 89 J = 1,NI
DO 89 II = 15,1,-1
X(J,II) = X(J,II-1)
```

```
89 KX(J,II) = KX(J,II-1)
```

```
C
```

```

DO 91 II = 15,1,-1
Y(II) = Y(II-1)
KY(II) = KY(II-1)
91 CONTINUE
C

DO 81 J = 1,NI ! INPUTIT
X(J,0) = XIN(J)
KX(J,0) = (XIN(J)-XMIN(J))/QUSTEP(J)
TMP = (XMAX(J)-XMIN(J))/QUSTEP(J)
IF((KX(J,0).GT.TMP).OR.(KX(J,0).LT.0)) THEN

    CALL MESSAGES(-1,Message1,'warning',INFO(1),INFO(2))
ENDIF
81 CONTINUE
C

TPMENA = -0.5*TULKO + 32.
IF(TPMENA.LT.23.) TPMENA=23.
IF(TPMENA.GT.50.) TPMENA=50.
C

Y(0) = TPMENA
KY(0) = (Y(0)-YMIN(1))/QUSTEP(0)
TMP = (YMAX(1)-YMIN(1))/QUSTEP(0)
IF((KY(0).GT.TMP).OR.(KY(0).LT.0)) THEN

CALL MESSAGES(-1,Message3,'warning',INFO(1),INFO(2))
ENDIF
ENDIF ! SWITCH = 1 TAI 3
-----
C
IF(SWITCH.EQ.1) THEN
C

OS = IADU(KY(1),KY(2),KX(1,1),KX(1,2))

IF(TIME.LT.1.50) TAU(OS) = TASE
IF(TIME.GE.1.50) THEN
IF(X(3,0).LT.10.) THEN
    IF(TAU(OS).GT.0.) TAU(OS) = (TAU(OS) + TROOM)/2.
    IF(TAU(OS).EQ.0.) TAU(OS) = TROOM
ELSE
    TAU(OS) = TASE
ENDIF
IF(TAU(OS).GT.30.) TAU(OS) = 30.0
IF(TAU(OS).LT.15.) TAU(OS) = 15.0
ENDIF

C
OS1 = IADS(KY(1),KY(2),KX(3,0),KX(3,10))
IF(TIME.LT.1.50) TAS(OS1) = TASE
IF(TIME.GE.1.50) THEN
IF(X(3,0).GT.10.) THEN
    TAS(OS1) = TROOM
ELSE
    TAS(OS1) = TASE
ENDIF
IF(TAS(OS1).GT.30.) TAS(OS1) = 30.0
IF(TAS(OS1).LT.15.) TAS(OS1) = 15.0
ENDIF

C
TPMENO = TPMENA
Call SetOutputValue(1, TPMENO)
C

```

```

R = R + ABS(TROOM - 20.0)
C
IF(TIME.GT.TALLAIIKA) SWITCH = 2
ENDIF ! SWITCH = 1
C
*****
C
2) MALLIN TÄYDENTÄMINEN
C
*****
C
IF(SWITCH.EQ.2) THEN
C
Call NearestNeighbour(1) ! TAU()
C
Call NearestNeighbour(2) ! TAS()
C
ENDIF ! SWITCH = 2
C
*****
C
3) LÄMMITYKSEN PREDIKTOINTI
C
*****
C
IF(SWITCH.EQ.3) THEN
C
IF(TULKO.GT.10.0) THEN
TPMENO = 23.
Call SetOutputValue(1,TPMENO)
RETURN
ENDIF
C
TPMENA = -0.5*ETULKO +32.
IF(TPMENA.LT.23.)TPMENA=23.
IF(TPMENA.GT.50.)TPMENA=50.
C
EDOSU = OS
IF(TAU(OS).GT.0.) THEN
OS = IADU(KY(1),KY(2),KX(1,1),KX(1,2))
TMP1 = TPMENA + (TASE - TAU(OS))*TKERR
ENDIF
C
IF(TAU(OS).EQ.0.) THEN
TMP1 = TPMENA
TAU(OS) = TAU(EDOSU)
ENDIF
C
EDOSS = OS1
IF(TAS(OS1).GT.0.) THEN
OS1 = IADS(KY(1),KY(2),KX(3,0),KX(3,10))
TMP2 = TPMENA + (TASE - TAS(OS1))*SKERR
ENDIF
C
IF(TAS(OS1).EQ.0.) THEN
TMP2 = TPMENA
TAS(OS1) = TAS(EDOSS)
ENDIF
C
IF((X(3,0).GT.100.).OR.(X(3,10).GT.100.)) THEN
TPMENO = TMP2
ELSE
TPMENO = TMP1
ENDIF
IF(TPMENO.LT.23.) TPMENO = 23.0

```

```

        IF(TPMENO.GT.50.) TPMENO = 50.0
C
R = R + ABS(TROOM - 20.0)
    Call SetOutputValue(1,TPMENO)
C
    IF (TIME.GT.(TALLAIKA+PREDAIKA)) SWITCH = 4
    ENDIF ! SWITCH=3
C
    RETURN
C
!-----
!If Needed, Get the Previous Control States if Discrete Controllers
are Being Used (#)
!Sample Code: CONTROL_LAST=getPreviousControlState(1)
!-----
!If Needed, Get the Values from the Global Storage Array for the
Static Variables (#)
!Sample Code: STATIC1=getStaticArrayValue(1)
!-----
!If Needed, Get the Initial Values of the Dynamic Variables from the
Global Storage Array (#)
!Sample Code: T_INITIAL_1=getDynamicArrayValueLastTimestep(1)
!-----
!Perform All of the Calculations Here to Set the Outputs from the
Model Based on the Inputs
!Sample Code: OUT1=IN1+PAR1
!If the model requires the solution of numerical derivatives, set
these derivatives and get the current solution
!Sample Code: T1=getNumericalSolution(1)
!Sample Code: T2=getNumericalSolution(2)
!Sample Code: DTDT1=3.*T2+7.*T1-15.
!Sample Code: DTDT2=-2.*T1+11.*T2+21.
!Sample Code: Call SetNumericalDerivative(1,DTDT1)
!Sample Code: Call SetNumericalDerivative(2,DTDT2)
!-----
!Set the Outputs from this Model (#,Value)
C    Call SetOutputValue(1, TPMENO) ! TPMENO
!-----
!If Needed, Store the Desired Discrete Control Signal Values for this
Iteration (#,State)
!Sample Code: Call SetDesiredDiscreteControlState(1,1)
!-----
!If Needed, Store the Final value of the Dynamic Variables in the
Global Storage Array (#,Value)
!Sample Code: Call SetValueThisIteration(1,T_FINAL_1)
!-----
C    *****
C    FUNKTOT IADU() JA IADS()
C    *****
CONTAINS
INTEGER FUNCTION IADU(I1,I2,I3,I4)
INTEGER I1,I2,I3,I4
INTEGER OSO
INTEGER N(10),NS(10),MAXOSO
COMMON/ALUE1/ N,NS,MAXOSO
C
OSO = N(2)*N(3)*N(4)*I1+N(3)*N(4)*I2+N(4)*I3+I4
IF((OSO.GT.MAXOSO).OR.(OSO.LE.1)) THEN

    CALL MESSAGES(-1,Message4,'warning',INFO(1),INFO(2))
    WRITE(*,*) MAXOSO,OSO

```



```

        OSO = MAXOSO
ENDIF
C
IADU = OSO

END FUNCTION IADU
C
INTEGER FUNCTION IADS(I1,I2,I3,I4)
INTEGER I1,I2,I3,I4
INTEGER OSO
INTEGER N(10),NS(10),MAXOSO
COMMON/ALUE1/ N,NS,MAXOSO
C
OSO = NS(2)*NS(3)*NS(4)*I1+NS(3)*NS(4)*I2+NS(4)*I3+I4
IF((OSO.GT.MAXOSO).OR.(OSO.LE.1)) THEN

        CALL MESSAGES(-1,Message4,'warning',INFO(1),INFO(2))
        WRITE(*,*) MAXOSO,OSO
        OSO = MAXOSO
ENDIF
C
IADS = OSO

END FUNCTION IADS
C
End
!-----

```